



“METALOGÉNESIS DE LAS MINERALIZACIONES AURÍFERAS DEL ÁREA DE EL VAPOR, ANTIOQUIA”

CAMILO ERNESTO DORADO MONTALVO

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS, DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS
BOGOTÁ, 2012.**



“METALOGÉNESIS DE LAS MINERALIZACIONES AURÍFERAS DEL ÁREA DE EL VAPOR, ANTIOQUIA”

CAMILO ERNESTO DORADO MONTALVO

**Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de:
Máster en Ciencias-Geología**

Director:

Juan Carlos Molano Mendoza

**Geólogo MSC. Profesor asociado Universidad Nacional de Colombia, sede
Bogotá**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS, DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS
BOGOTÁ, 2012.**

Para mi esposa... porque me enseñaste que vale la pena soñar

"El genio se compone del dos por ciento de talento y del noventa y ocho por ciento de perseverante aplicación" Ludwig van Beethoven.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación se encuentra incluido en el proyecto “Anteproyecto de Investigación Metalográfica, Microtermométrica, Geoquímica e Isotópica para Algunos Yacimientos Minerales en Colombia”, suscrito entre la Universidad Nacional de Colombia y COLCIENCIAS. A todos sus integrantes, muchas gracias. Igualmente, fue apoyado en sus inicios por el proyecto “Asesoría y ejecución de ensayos de laboratorio para la elaboración del Mapa Metalogénico de Colombia” suscrito entre la Universidad Nacional de Colombia e INGEOMINAS.

Es probable que al efectuar estos agradecimientos me falte alguna persona por mencionar, sin embargo, deseo comenzar agradeciendo de manera especial al profesor Juan Carlos Molano, quien con su desinteresada ayuda ha apoyado siempre la ejecución de esta investigación. No menos importante ha sido el apoyo del profesor Colombo Tassinari, en especial por la oportunidad de conocer las instalaciones de la Universidade de São Paulo y efectuar los análisis de Pb incluidos en esta investigación, sin solicitar nada a cambio. Deseo expresar mi admiración y profundo agradecimiento al profesor Clemente Recio, por la elaboración en tiempo récord, de los análisis de isótopos de oxígeno y deuterio y por sus valiosas recomendaciones en este campo.

Agradezco a Sonia Rojas por la elaboración de análisis de difracción de rayos X y espectroscopia Raman y a todo el personal del Servicio Geológico de los Estados Unidos por permitir dichos análisis sin ningún costo.

Deseo expresar un agradecimiento especial a Armando Sánchez, por su ayuda en la elaboración de las secciones delgadas pulidas y doblemente pulidas.

A GEMAS SAS por su apoyo en la elaboración de algunos análisis isotópicos.

Al Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana (CDTEC), por la realización de análisis de espectroscopía Raman.

A todos y cada uno de los que me han permitido llegar hasta este punto, especialmente a mi madre por ser un soporte en mi vida, a Ángela, por ser como una segunda madre, a mis familiares y compañeros de universidad, les agradezco infinitamente por su apoyo y paciencia.

Finalmente y no por eso menos importante, a Paola, porque sin tí nunca hubiera sido posible llegar hasta aquí, por tu amor y comprensión, gracias...

RESUMEN

Las mineralizaciones auríferas de El Vapor están emplazadas epigenéticamente en el Batolito y las Sedimentitas de Segovia a ambos lados de la falla de El Nús, una estructura rumbodeslizante relacionada a la falla de Palestina. Se componen de vetas, venas y venillas de espesor variable, desde unos pocos centímetros hasta dos metros aproximadamente, discontinuas a continuas, sigmoidales, anastomosadas y en stockwork y por brechas hidrotermales (hidráulicas) que embeben fragmentos angulares de las rocas encajantes.

El análisis mineralógico permitió reconocer tres eventos de mineralización caracterizados por la presencia de distintos tipos de cuarzo, a los cuales se asocian minerales de mena, entre los cuales el más abundante es pirita. Los eventos uno y dos representan interés económico, pues asociado a los sulfuros se encuentran abundantes partículas de oro electrum. Análisis de microsonda electrónica evidencian la ausencia de arsénico en los cristales de pirita y confirman las observaciones petrográficas que indican inexistencia de arsenopirita en el sistema.

Las zonas mineralizadas presentan halos de alteración poco extensos pero de gran intensidad, restringidos en la mayoría de los casos a los respaldos de las vetas, compuestos por moscovita \pm illita (?) + cuarzo y carbonato (calcita) + clorita \pm epidota, que indican un fluido hidrotermal con un pH cercano a la neutralidad.

El análisis microtermométrico y espectroscópico del primer evento de mineralización indica la presencia de cuatro tipos diferentes de inclusiones fluidas, de las cuales los dos primeros (tipo I y tipo II), representan fluidos carbónicos de salinidad moderada y temperaturas mínimas de entrapamiento entre 213 y 340°C, compuestos principalmente por CO₂, pero con cantidades variables de N₂ y CH₄, que se explican mediante procesos de reacción con las rocas caja, en particular con los shales de las Sedimentitas de Segovia y cuyas presiones mínimas de entrapamiento se encuentran entre 50 y 300MPa, correspondientes a una profundidad entre 2 y 10Km.

Las evidencias petrográficas, microtermométricas y espectroscópicas favorecen la interpretación de un proceso de mezcla isothermal de fluidos como la causa más probable de desestabilización de los complejos bisulfurados en los cuales se transportó el oro.

La composición isotópica de $\delta^{34}\text{S}$ en pirita, esfalerita y galena, presenta valores entre -1.4 y + 5.1, variable entre eventos de mineralización, pero sobre todo espacialmente. Debido a que las características de las mineralizaciones de El Vapor indican que éstas fueron generadas por fluidos hidrotermales relativamente reducidos, con pH cercano a la neutralidad, condiciones prácticamente uniformes en el depósito, las pequeñas variaciones identificadas en la composición de $\delta^{34}\text{S}$ de sulfuros, con valores ligeramente más positivos hacia las Sedimentitas de Segovia, sugieren pequeños cambios en el pH y el estado de oxidación en el fluido mineralizante, que se relaciona con su reacción con los shales carbonosos de esta unidad y que insinúan un patrón de paleoflujo desde el suroccidente hacia el nororiente. La relativa homogeneidad de la composición isotópica del azufre, indica que ésta se incorporó en los sulfuros a partir de una única fuente, que no puede relacionarse directamente con ninguna de las unidades geológicas presentes en la zona, debido a la inexistencia de análisis representativos de su composición.

Las temperaturas de fraccionamiento isotópico calculadas con pares Py-Sp y Py-Gn para el primer evento de mineralización, son concordantes con las mediciones microtermométricas, indicando que para este evento se alcanzaron las condiciones de equilibrio isotópico.

Por su parte, la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y δD del fluido hidrotermal en equilibrio con moscovita, calculada a 300°C, varía entre 6 y 12‰ y -17 y -21‰, respectivamente y es compatible con aguas de origen metamórfico.

Las composiciones isotópicas de Pb en sulfuros y cuarzo, indican que el origen de este elemento y por inferencia de los metales en El Vapor, corresponde a rocas de la corteza superior y señalan a las Sedimentitas de Segovia como la fuente más

probable, indicando también que los fluidos pudieron circular también por el Batolito de Segovia, lixiviando plomo. Una de las muestras de galena analizada intercepta la curva de evolución isotópica de plomo del modelo de Stacey & Kramers (1975) en 21 Ma., aunque no es definitiva ni concluyente, indica una edad modelo probable para las mineralizaciones auríferas de El Vapor.

Las características texturales, mineralógicas, de composición, temperatura mínima de entrapamiento, profundidad de formación, estado de oxidación de los fluidos hidrotermales y firma isotópica de El Vapor son concordantes con muchas de las propuestas para los depósitos tipo Oro Orogénico e implican que para el momento de su formación, existió un proceso de orogénesis en lo que hoy constituye el flanco oriental de la Cordillera Central. Más aún, dichas características amplían las perspectivas de desarrollo de un proyecto minero en el área y proporcionan pautas para la exploración de manifestaciones minerales similares.

Palabras Clave: Mineralógico, microtermométrico, espectroscópico, isotópico, fluido hidrotermal, reducido, El Vapor, Orogénico.

ABSTRACT

Epigenetic El Vapor gold deposit is hosted by Batolito de Segovia and Sedimentitas de Segovia at both sides of El Nús fault, a strike slip structure related with Palestina fault. Gold mineralization is composed by continuous and discontinuous, sigmoidal and stockwork veins and veinlets from few centimeters to two meters width and by hydrothermal breccias with irregular wall rock fragments.

Mineralogical analysis allows recognizing three different ore-stages, characterized by distinctive quartz types with ore minerals added, mostly pyrite. The first and second ore events represent economic interest because abundant gold particles included inside sulfides. Electronical microprobe analyses points out the absence of As inside pyrite crystals and confirm petrographic observation of arsenopyrite inexistence.

Mineralized areas present narrow but intense surrounding veins hydrothermal alteration halos, composed by muscovite \pm illite (?) + quartz and carbonate (calcite) + chlorite \pm epidote, showing a nearly neutral pH hydrothermal fluid interaction.

Microthermometric and spectroscopic analysis for the first ore-stage shows the existence of four different fluid inclusion types, the first and second of which represents carbonic fluids of moderate salinity and minimum trapping temperature between 213 and 3450°C, composed mainly by CO₂, but with varying amounts of N₂ and CH₄ related with wall rocks fluid reaction, specially with black shales of Sedimentitas de Segovia. Minimal entrapment pressures are between 60 and 300 MPa, corresponding from 2 to 10 Km. depth.

Petrographic, microthermometric and spectroscopic evidences favors an isothermal fluid mixing as the most probable gold bisulfide complexes destabilization mechanism.

$\delta^{34}\text{S}$ isotopic composition of pyrite, sphalerite and galena varies between -1.4 and +5.1‰, variable for different ore-stages but specially between different areas. At the established physicochemical conditions for El Vapor (reduced fluid, almost neutral pH), small variations in the $\delta^{34}\text{S}$ sulfide composition, with more positive values toward Sedimentitas de Segovia, suggest changes of pH and $f\text{O}_2$ of the ore fluid, related with a reaction process with carbonaceous black shales. $\delta^{34}\text{S}$ variations may also suggest a paleo flow pattern from southwest to northeast direction.

Almost homogeneous sulfur isotopic composition indicates a unique source, that cannot be assigned to any of the geological units cropping in the area because the lack of representative analysis of their composition.

Isotopic fractionation temperatures of Py-Sp and Py-Gn mineral pairs for the first ore-stage are similar with microthermometric analysis, showing that isotopic equilibrium for this stage was reached.

On the other hand, $\delta^{18}\text{O}$ and δD hydrothermal isotopic composition in equilibrium with muscovite, calculated at 300°C, varies between +6 to +12‰ and -17 to -21‰, compatible with a metamorphic water origin.

Sulfides and quartz lead isotopic composition shows an upper crust origin, pointing out to Sedimentitas de Segovia as the most probable source, but suggesting that hydrothermal fluid flows inside Batolito de Segovia, washing lead too. One of the analyzed galena samples plot on the Stacey & Kramers (1975) isotopic model trend at 21 Ma. Although this age is not conclusive, is the most plausible for the El Vapor gold deposit so far.

Textural, mineralogical and compositional features as well as minimum entrapment temperature, formation pressure, $f\text{O}_2$ and isotopic composition of El Vapor are similar to proposed characteristics for Orogenic Gold deposits and implies that for

the age it's development, an orogenic process at the eastern flank of Central Cordillera took place. Those features improve the possibilities of a mining project development at this area and provide exploration clues for similar mineral occurrences nearby.

Key Words: Mineralogical, microthermometric, spectroscopic, isotopic, hydrothermal fluid, reduced, El Vapor, Orogenic.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS	2
3.	METODOLOGÍA.....	3
3.1	RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE.....	3
3.2	TRABAJO DE CAMPO	3
3.3	TRABAJO DE LABORATORIO: PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y REALIZACIÓN DE ANÁLISIS	4
3.4	TRABAJO DE OFICINA.....	5
4.	TRABAJOS PREVIOS.....	6
5.	GENERALIDADES SOBRE LA ZONA DE LA ZONA DE ESTUDIO: UBICACIÓN Y ACCESO.....	8
	Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.	9
6.	MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	10
7.	GEOLOGÍA LOCAL.....	15
8.	RELACIONES DE CAMPO: ROCAS ENCAJANTES, CONTROLES DE MINERALIZACIÓN Y TEXTURAS DE LAS MINERALIZACIONES AURÍFERAS DEL VAPOR, ANTIOQUIA.....	18
8.1	INTRODUCCIÓN.....	18
8.2	METODOLOGÍA	18
8.3	ROCAS ENCAJANTES	19
8.4	CONTROLES DE MINERALIZACIÓN	24
8.5	TEXTURAS DE MINERALIZACIÓN.....	25
9.	PETROGRAFÍA DE MENA Y GANGA, MICROQUÍMICA MINERAL Y ALTERACIONES HIDROTERMALES DE LAS MINERALIZACIONES AURÍFERAS DE EL VAPOR, ANTIOQUIA.....	34
9.1	INTRODUCCIÓN.....	34
9.2	METODOLOGÍA	35
9.3	PETROGRAFÍA DE MENA Y GANGA EN EL VAPOR	37
9.3.1	MINERALOGÍA DE MENA.....	37
9.3.2	MINERALOGÍA DE GANGA.....	51

9.4	SECUENCIA PARAGENÉTICA	55
9.5	MICROQUÍMICA DE MINERALES DE MENA	61
9.5.1	ANÁLISIS ELEMENTAL DE ORO	62
9.5.2	ANÁLISIS DE PIRITA	62
9.5.3	GALENA.....	64
9.5.4	ESFALERITA	66
9.5.5	CALCOPIRITA	67
9.6	ALTERACIONES HIDROTERMALES.....	67
9.6.1	CARBONATACIÓN - ALTERACIÓN PROPILÍTICA	68
9.6.2	ALTERACIÓN FÍLICA.....	70
9.7	ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	72
10.	FLUIDOS HIDROTERMALES EN EL VAPOR: EVALUACIÓN DE SU COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS.....	73
10.1	INTRODUCCIÓN.....	73
10.2	METODOLOGÍA	73
10.3	PETROGRAFÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS: PARAGÉNESIS Y TIPOS.....	76
10.3.1	INCLUSIONES TIPO I	78
10.3.2	INCLUSIONES TIPO II	78
10.3.3	INCLUSIONES TIPO III.....	80
10.3.4	INCLUSIONES TIPO IV	83
10.4	ANÁLISIS MICROTERMOMÉTRICO DE INCLUSIONES FLUIDAS EN EL VAPOR	83
10.4.1	ANÁLISIS MICROTERMOMÉTRICO DE INCLUSIONES TIPO I	83
10.4.2	ANÁLISIS MICROTERMOMÉTRICO DE INCLUSIONES TIPO II	86
10.4.3	ANÁLISIS MICROTERMOMÉTRICO DE INCLUSIONES TIPO III	92
10.4.4	ANÁLISIS MICROTERMOMÉTRICO DE INCLUSIONES TIPO IV.....	96
10.5	ESTIMACIÓN DE LA PRESIÓN DE ENTRAMPAMIENTO.....	96
10.6	ESPECTROSCOPIA RAMAN	99
10.7	MECANISMOS DE ENTRAMPAMIENTO DE INCLUSIONES RICAS EN LÍQUIDO Y EN VAPOR: INMISCIBILIDAD VS MEZCLA DE FLUIDOS.....	101
10.8	CONDICIONES DE pH Y ESTADO DE OXIDACIÓN DE LOS FLUIDOS MINERALIZANTES EN EL VAPOR	104
10.9	MECANISMOS DE TRANSPORTE Y DEPÓSITO DEL ORO	105

11.	ANÁLISIS ISOTÓPICOS: FUENTE DE LOS FLUIDOS Y METALES EN EL VAPOR	108
11.1	INTRODUCCIÓN.....	108
11.2	METODOLOGÍA.....	108
11.3	ISÓTOPOS DE AZUFRE	111
11.3.1	COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE SULFUROS	111
11.3.2	GEOTERMOMETRÍA	118
11.3.3	FUENTE DEL AZUFRE.....	119
11.4	ISÓTOPOS DE OXÍGENO Y DEUTERIO	120
11.4.1	TIPO DE FLUIDO MINERALIZANTE EN EL VAPOR	121
11.5	ISÓTOPOS DE PLOMO.....	122
11.5.1	EDAD MODELO DE LAS MINERALIZACIONES DEL VAPOR.....	127
12.	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	130
13.	RECOMENDACIONES.....	140
14.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141

ANEXOS

ANEXO 1. ANALISIS DE DIFRACCION DE RAYOS X

ANEXO 2. DIAGRAMAS DE INCLUSIONES FLUIDAS

ANEXO 3. DATOS MICROTERMOMÉTRICOS DE INCLUSIONES FLUIDAS

ANEXO 4. ESPECTROSCOPIA RAMAN

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.	9
Figura 2. Evolución tectónica de la margen noroccidental de Suramérica durante el Cretáceo. Tomado de Villagómez <i>et al.</i> , 2011.....	14
Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio.	21
Figura 4. Fragmentos de shales de las Sedimentitas de Segovia embebidos dentro de una veta de cuarzo en El Vapor. A) PPL, B) PPX. Nótese la presencia de textura augen de cuarzo, indicativos de un proceso de milonitización sobreimpuesto. Sección 1442.	23
Figura 5. A) Detalle dique de textura afanítica fuertemente alterado que intruye las Sedimentitas de Segovia. Mina El Porvenir. B) Detalle dique alterado hidrotermalmente, cortado y brechado por vetillas de cuarzo, lo que indica que éste es anterior al evento de mineralización. Mina La Menez.....	23
Figura 6. A) Diagrama rosa para cincuenta y nueve (59) datos de planos de estratificación en las Sedimentitas de Segovia y B) sesenta (60) datos de vetas, venas y vetillas encontradas en las labores subterráneas de la zona de estudio. Nótese la concordancia entre las tendencias de planos de estratificación y de zonas mineralizadas, indicativas de un control litológico de las mismas.....	25
Figura 7. A) Veta de textura brechoide compuesta por agregados de cuarzo lechoso masivo y cristales de pirita de grano grueso, hacia los respaldos se observa un halo delgado de alteración cuarzo+sericita. Mina La Menez. B) Detalle de veta de 30cm de espesor, compuesta por agregados de cuarzo lechoso masivo con abundantes cristales de pirita de grano grueso y esfalerita, esta estructura presenta fragmentos embebidos de cuarzodioritas con alteración cuarzo+sericita pervasiva de intensidad fuerte. Mina Cien Puertas.	27
Figura 8. Venas y vetillas sinuosas, discontinuas, anastomosadas y sigmoidales de la parte central del tren principal de mineralización de El Vapor, encajadas en shales negros de las sedimentitas de Segovia y compuestas por agregados masivos de cuarzo lechoso y cristales de pirita gruesa. Nótese como el contenido de sulfuros es muy variable, alcanzando incluso el 20% en algunas zonas. A) y B), mina Los Misteriosos. C) y D) mina La Fortuna. E) y F) Testigos de secciones delgadas pulidas de muestras 1450 y 1268,	

provenientes de las minas El Bús y La Fortuna, respectivamente, que muestran texturas de mineralización brechoides..... 28

Figura 9. A) Veta de cuarzo lechoso de 15cm de espesor, continua concordante con los planos de estratificación de las Sedimentitas de Segovia. Mina El Porvenir. B) Detalle de vetillas sinuosas discontinuas de cuarzo lechoso al parecer sin-cinemáticas, dentro de shales negros, en los que se ha desarrollado bitumen por acción de cizallamiento intenso. Mina El Porvenir. C) y D) Brecha hidrotermal compuesta por agregados cristalinos de cuarzo lechoso y sulfuros (pirita, galena y esfalerita). Nótese la presencia de fragmentos angulares de diques de textura aplítica de color gris con alteración Qtz+Ser pervasiva de intensidad fuerte y de shales negros. Mina El Infierno. 31

Figura 10. A) Veta de aproximadamente 30 cm de espesor con zonación interna en la que los sulfuros se ubican hacia la parte media, mientras que el centro de la misma está rellena por cristales de cuarzo con textura en peine. Mina La Argentina. B) Detalle testigo de sección delgada pulida proveniente de la parte media de veta en la mina La Argentina. C) Vena de cuarzo lechoso con pocos sulfuros, que presenta cristales de cuarzo con textura en peine hacia el centro de la misma, relleno de cavidades, lo que es indicativo de su depósito en un evento tardío. D) Stockwork de vetillas de cuarzo lechoso dentro de cuarzodioritas del Batolito de Segovia. Mina El Muerto..... 33

Figura 11. Mapa ubicación de secciones delgadas pulidas..... 36

Figura 12. A) y B) Cristales subidiomórficos de pirita fina desarrollada hacia los respaldos de zonas mineralizadas. Secciones 1449 y 1450. Abreviaturas según Kretz (1983). 38

Figura 13. A) Cristales idiomórficos de pirita de grano grueso, con cristales excepcionalmente grandes que alcanzan hasta 1 cm. Muestra 1415, mina La Menez. B) Agregado de cristales subidiomórficos de pirita de grano grueso con textura brechoide hacia la parte central de vena de cuarzo lechoso. Muestra 1257B, mina La Fortuna. C) Cristales de pirita de grano grueso con fracturas irregulares rellenas por galena, indicativo de una temporalidad tardía. Sección 1267, mina La Menez. D) Microfotografía de la sección 1257B, en la que se muestran cristales de pirita de grano grueso con inclusión de cristal de oro electrum. Abreviaturas según Kretz (1983). 39

Figura 14. Cristales de oro de gran tamaño incluidos dentro de cristales de pirita de grano grueso, representativos del primer evento de mineralización identificado. A) sección 1429, mina Cien Puertas y B) sección 1437, mina El Cambuche, C) sección 1439, mina El Verrugoso y D) sección 1449, mina El Bus. En esta última fotografía se observa como las partículas de oro coexisten con pirrotina. Abreviaturas según Kretz (1983). 40

Figura 15. Microfotografías de cristales de oro que rellenan fracturas dentro de cristales de pirita de grano grueso, indicativo del segundo evento de mineralización identificado. A) y B) acompañante de galena y esfalerita, sección 1267, mina La Menez, C) y D) sección 1449, mina El Bus, E) sección 1439, mina El Verrugoso y F) sección 1401, mina La Argentina. Abreviaturas según Kretz (1983). 42

Figura 16. A) Inclusión sólida de galena dentro de cristal de pirita de grano grueso. Sección 1257 (A), mina La Fortuna. B) Inclusión sólida de galena coexistiendo con calcopirita dentro de cristal de pirita de grano grueso, indicativo de cristalización coetánea durante el primer evento de mineralización identificado. Sección 1251, mina El Bus. Abreviaturas según Kretz (1983). 43

Figura 17. Segunda generación de galena identificada en las mineralizaciones de El Vapor, que rellena fracturas abiertas y embebe cristales de pirita de grano grueso, acompañada de calcopirita y esfalerita. A) Sección 1442, mina El Verrugoso y B) sección 1401, mina La Argentina. Abreviaturas según Kretz (1983). 44

Figura 18. Inclusiones sólidas de calcopirita dentro de cristales de pirita de grano grueso, asociada con esfalerita, indicativas de crecimiento coetáneo con dicho mineral. A) y B), sección 1257 (A). Abreviaturas según Kretz (1983). 45

Figura 19. A) Calcopirita rellanando fracturas abiertas entre cristales de pirita de grano grueso, segundo evento de mineralización, B) cristal de calcopirita rellanando espacios vacíos entre cristales de cuarzo de textura masiva. Sección 1252, mina Los Misteriosos. Abreviaturas según Kretz (1983). 46

Figura 20. Microfotografías pequeñas gotas de calcopirita dentro de cristales de esfalerita, mostrando texturas de emulsión y exsolución. A) sección 1401, mina La Argentina, B) sección 1443, mina Las Margaritas. Abreviaturas según Kretz (1983). 47

Figura 21. Segunda y tercera (?) generación de esfalerita, diferenciables por un color oscuro y claro, respectivamente. Se observa como la esfalerita mas clara, pobre en hierro, corta la mineralogía existente. Secciones 1438 y 1269, minas El Verrugoso y El Porvenir respectivamente. Abreviaturas según Kretz (1983). 48

Figura 22. Inclusiones sólidas de pirrotina que coexisten con calcopirita, dentro de cristales de pirita de grano grueso, primer evento de mineralización identificado. A)

Sección 1257 (A), mina La Fortuna y B) sección 1440, mina El Verrugoso. Abreviaturas según Kretz (1983). 49

Figura 23. Cristales de proustita-pirargirita, mineral tardío en la secuencia de depósito en El Vapor y que coexiste con cristales de galena, calcopirita y esfalerita. Secciones 1401 y 1267 respectivamente. Abreviaturas según Kretz (1983). 49

Figura 24. Bornita y covelina de alteración supergénica desarrolladas en los bordes de un cristal de calcopirita. Sección 1252, mina Los Misteriosos. 50

Figura 25. Microfotografías de agregados de cristales sub a euhedrales de cuarzo masivo, principal mineral en las mineralizaciones de El Vapor. Secciones 1421 y 1257(a) respectivamente. Abreviaturas según Kretz (1983). 52

Figura 26. Microfotografías de agregados de cristales de grano fino, anhedrales y de bordes suturados de cuarzo en mosaico, que rellenan espacios entre cristales de cuarzo masivo. Secciones 1443 y 1445 respectivamente. Abreviaturas según Kretz (1983). 53

Figura 27. Microfotografías de cristales de cuarzo con textura “comb”, que rellenan parcialmente fracturas entre cristales de cuarzo masivo (A) y vetillas sinuosas que cortan toda la mineralogía precedente (B). Secciones 1443 y 1256 respectivamente. 54

Figura 28. A) Vetilla de carbonato (calcita) que atraviesa cristales de cuarzo masivo. Sección 1267. B) Cristales subhedrales de calcita que rellenan espacios. Sección 1269. Abreviaturas según Kretz (1983). 55

Figura 29. Microfotografías representativas del evento mineralizante, hacia El respaldo de veta de cuarzo. En las fotografías se observa la asociación pirita (grano fino) + cuarzo mosaico + sericita (illita + moscovita), sección 1430, mina Cien Puertas. Abreviaturas según Kretz (1983). 56

Figura 30. Microfotografías asociaciones minerales primer evento de mineralización. A) sección 1251, mina El Bus, B), C) y D) sección 1257(A), mina La Fortuna, E) sección 1448, mina El Bus, F) sección 1445, mina Las Margaritas. Abreviaturas según Kretz (1983). 57

Figura 31. Microfotografías representativas del segundo evento de mineralización identificado. Sección 1267, mina La Menez, B), C) y D), sección 1401, mina La Argentina,

E) sección 1449, mina El Bus, F) sección 1257(B), mina La Fortuna. Abreviaturas según Kretz (1983)..... 59

Figura 32. Microfotografías representativas del tercer evento de mineralización, en el que cristales de cuarzo con textura en peine rellenan vetillas acompañados por pirita. A) y B) sección 1256, mina La Fortuna, C) y D) sección 1421, mina La Menez. Abreviaturas según Kretz (1983). 60

Figura 33. Secuencia paragenética para las mineralizaciones de El Vapor. Los eventos uno y dos se encuentran separados por un evento fuerte de fracturamiento. 61

Figura 34. Histograma de frecuencia del porcentaje en peso del contenido de oro en los cristales analizados..... 65

Figura 35. (A) y (B). Cristales de clorita, carbonato y pirita, producto de la alteración de cristales de anfíbol, sección 1265 (C) y (D) Cristales subhedrales de carbonato (Cal) producto de alteración de plagioclasa, obsérvese la presencia de moscovita y cuarzo de alteración filica, sección 1440. Abreviaturas según Kretz (1983). 69

Figura 36. Esquema de distribución de alteración cuarzo + sercitia + pirita de grano fino hacia los respaldos de las zonas mineralizadas, en las Sedimentitas de Segovia, mina La Fortuna. 70

Figura 37. Microfotografías de alteración filica de intensidad fuerte y pervasiva, que borra la textura original de la roca. A) Sección 1444, mina Las Margaritas, B) sección 1430, mina Cien Puertas. Abreviaturas según Kretz (1983)..... 71

Figura 38. Mapa de ubicación de secciones delgadas doblemente pulidas analizadas.... 75

Figura 39. Mapas de inclusiones fluidas que ilustran la relación entre diferentes generaciones de inclusiones fluidas. (A) Sección 1443, (B) sección 1414, (C) sección 1419 y (D) sección 1418. 77

Figura 40. Evidencias de modificaciones post entrapamiento en inclusiones tipo II en El Vapor. A) "stretching" y B) "necking down". Sección 1419. 80

Figura 41. Ejemplo de rutina de análisis microtermométrico en una inclusión de tipo I, en la que se observan cinco transiciones de fase. La fusión final del hielo en este caso ocurrió en -6.8°C Sección 1443.	85
Figura 42. Histogramas de frecuencia para la temperatura de primera fusión (T_e) en los distintos tipos de inclusiones encontradas en El Vapor.	86
Figura 43. Histograma de frecuencia para la temperatura de fusión del CO_2 sólido (T_{mCO_2}) en las inclusiones tipo II.	88
Figura 44. Rutina de análisis microtermométrico en una inclusión de tipo II, en la que se observan seis transiciones de fase. La fusión final del hielo en este caso ocurrió en -3.2°C . Sección 1419.	90
Figura 45. Histogramas de frecuencia para la temperatura de fusión final del hielo (T_{mIce}) en los distintos tipos de inclusiones encontradas en El Vapor.	91
Figura 46. Histogramas de frecuencia para la temperatura de fusión de clatratos (T_{mClath}) en las inclusiones de los tipos I y II.	94
Figura 47. Histograma de frecuencia para la temperatura de homogenización de las fases carbónicas (T_{hCO_2}) en las inclusiones de tipo II.	94
Figura 48. Histogramas de frecuencia para la temperatura de homogenización total (T_h) en los distintos tipos de inclusiones encontradas en El Vapor. Nótese como la temporalidad relativa de las inclusiones se relaciona claramente con sus temperaturas de homogenización.	97
Figura 49. Isócoras calculadas mediante el programa ISOCHORE (Bakker, 1997; Bakker & Brown, 2003) para las inclusiones tipo II en El Vapor, representativas de la presión mínima de entrapamiento, variable entre 60 y 300MPa.	98
Figura 50. Espectros Raman de inclusiones tipo I y II de El Vapor, en los que se identifica la presencia de CO_2 , N_2 y CH_4 , que componen la fase de vapor. Es notoria la ausencia de CH_4 en algunas de las muestras analizadas, mientras que en otras alcanza hasta un 14%. A) sección 1443, B) sección 1418, C) sección 1428(b).	100

Figura 51. Diagrama Th vs salinidad para las inclusiones tipo I y II de El Vapor, en el que se observa una tendencia de incremento de la salinidad para inclusiones tipo II en un rango de temperatura constante, mientras que para inclusiones tipo I, ésta se encuentra en valores mucho más restringidos para temperaturas similares. Esta tendencia se interpreta como el producto de un proceso de mezcla isothermal de fluidos, representados por los dos tipos de inclusiones descritos. Modificado de Wilkinson, 2001. 103

Figura 52. Diagrama de fugacidad de oxígeno vs temperatura para un pH=5.5 a 300 MPa (modificado de Jia *et al.*, 2000) en el que se calculó el estado de oxidación de los fluidos hidrotermales de El Vapor a partir de las temperaturas de homogenización total, por debajo del buffer hematita-magnetita y entre CO₂-CH₄ (Py-Po), como lo indica la mineralogía presente y los resultados del estudio microtermométrico y espectroscópico. 106

Figura 53. Distribución de muestras utilizadas para análisis de isótopos de azufre en El Vapor..... 109

Figura 54. Composición isotópica de $\delta^{34}\text{S}$ en sulfuros de los diferentes eventos de mineralización identificados en El Vapor..... 113

Figura 55. Mapa de distribución espacial y temporal de la composición isotópica de $\delta^{34}\text{S}$ para pirita. Nótese como los valores se incrementan hacia el noreste, lo que puede sugerir un patrón de paleoflujo..... 115

Figura 56. Diagrama de fugacidad de oxígeno vs pH calculado a 250°C, que muestra la variación en la composición isotópica de $\delta^{34}\text{S}$ de cristales de pirita desde el suroccidente (campo de color verde) hacia el nororiente (campo rojo) y que se interpreta como el resultado de pequeñas variaciones en el estado de oxidación y el pH del fluido mineralizante, producto de su reacción con shales carbonosos de las Sedimentitas de Segovia. $\delta^{34}\text{S}=0\text{‰}$, fuerza iónica =1 y mK+=0.1 m. Los campos de estabilidad de los minerales están representados $a_{\text{S}}=0.01$ y $f_{\text{CO}_2} = 1 \text{ atm}$. Modificado de Greig *et al.*, 1971 (en Rye & Ohmoto, 1974). 117

Figura 57. Diagrama de composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y δD para el fluido hidrotermal en El Vapor, calculadas a 300°C en equilibrio con moscovita y cuarzo. Modificado de Shepard, 1986. 122

Figura 58. (A) Diagrama plumbotectónico que ilustra la evolución uranogénica de plomo para distintos reservorios isotópicos según el modelo de Zatman & Doe (1981) en el que se ilustra la composición isotópica de sulfuros y cuarzo de las mineralizaciones auríferas

de El Vapor, así como de shales carbonosos de las Sedimentitas de Segovia y una muestra de feldespato del Batolito de Segovia y que se muestra en detalle en (B). 126

Figura 59. (A) Diagrama plumbotectónico que ilustra de evolución toriogénica de plomo para distintos reservorios isotópicos según el modelo de Zatman & Doe (1981) en el que se ilustra la composición isotópica de sulfuros y cuarzo de las mineralizaciones auríferas de El Vapor, así como de shales carbonosos de las Sedimentitas de Segovia y una muestra de feldespato del Batolito de Segovia y que se muestra en detalle en (B). 128

Figura 60. Edad modelo para una muestra de galena de las mineralizaciones de El Vapor, que intersecta la curva de evolución de Stacey & Kramers (1975) en 21 Ma. Por el momento, esta es la mejor edad obtenida para este depósito. 129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición en Wt% de 47 puntos de análisis en cristales de oro de El Vapor.. 63

Tabla 2. Composición en Wt% de 30 puntos de análisis en cristales de pirita de El Vapor.
..... 65

Tabla 3. Composición en Wt% de 24 puntos de análisis en cristales de galena de El Vapor..... 66

Tabla 4. Resumen de las principales características y la clasificación de las inclusiones fluidas en El Vapor. 78

Tabla 5. Propiedades calculadas de las inclusiones tipo I, obtenidas con el programa ICE (Bakker, 1997; Bakker & Brown, 2003)..... 87

Tabla 6. Propiedades calculadas de las inclusiones tipo II, obtenidas con el programa Q2 (Bakker, 1997; Bakker & Brown, 2003).....	92
Tabla 7. Propiedades calculadas de las inclusiones tipo III, obtenidas con el programa BULK (Bakker, 1997; Bakker & Brown, 2003)	95
Tabla 8. Resumen de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos en sulfuros de los diferentes eventos de mineralización identificados en El Vapor.	112
Tabla 9. Temperaturas de fraccionamiento isotópico calculadas para pares de sulfuros en los tres eventos de mineralización de El Vapor.....	118
Tabla 10. Resultados analíticos de isótopos estables en las mineralización de El Vapor.	120
Tabla 11. Razones isotópicas de Pb para muestras de roca total, sulfuros y silicatos de El Vapor	124

LISTA DE LÁMINAS

<i>Lámina 1</i>	81
-----------------------	----

1. INTRODUCCIÓN

La descripción de los rasgos genéticos de un depósito mineral permite dilucidar el ambiente tectónico en el que se formó y aporta evidencias acerca de los procesos geológicos actuantes al momento de su desarrollo.

El presente estudio tiene como objetivo fundamental analizar las principales características de las mineralizaciones auríferas de El Vapor, ubicadas en el flanco oriental de la Cordillera Central en el departamento de Antioquia, una zona con minería artesanal desde hace más de cuarenta años, de la cual no se conoce prácticamente ningún aspecto descriptivo o genético, indispensable para comprender los procesos geológicos que les dieron lugar.

Una investigación integrada permite resolver interrogantes acerca de las características mineralógicas, texturales y del origen de los fluidos que dieron lugar a las mineralizaciones de El Vapor, aportando evidencias acerca de la evolución del flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia y a su vez, ayuda a definir el potencial geológico para la ocurrencia de depósitos minerales similares en zonas cercanas.

2. OBJETIVOS

El principal objetivo de esta investigación es realizar una aproximación a los mecanismos de formación de las mineralizaciones auríferas del área de El Vapor, estableciendo los procesos geológicos determinantes en su génesis. Dicho objetivo general puede subdividirse en los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar la mineralogía del depósito aurífero de El Vapor, tanto de mena como de ganga y de alteración, estableciendo la secuencia paragenética de formación, como una aproximación a su evolución en el tiempo.
2. Definir los mecanismos de control de mineralización y su relación de con la roca caja.
3. Fijar, mediante el análisis microtermométrico de inclusiones fluidas y espectroscopía Raman, la composición, salinidad y temperatura - presión mínima de entrapamiento del fluido responsable de las mineralizaciones de El Vapor
4. Establecer, mediante el análisis de isótopos estables y radiogénicos la fuente del azufre y de los metales, así como la composición isotópica del fluido involucrado en la generación de las mineralizaciones.

3. METODOLOGÍA

El desarrollo del presente trabajo de investigación se efectuó en cinco (5) etapas metodológicas ejecutadas en orden lógico, cada una de las cuales permitió avanzar en la obtención de los objetivos propuestos. Las fases metodológicas son expuestas a continuación:

3.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE

Se efectuó la recopilación, revisión y análisis de información bibliográfica referente a los tópicos a tratar en el desarrollo de la investigación y que incluye entre otros, geología regional y tectónica, mineralogía y texturas de depósitos minerales, inclusiones fluidas, geoquímica de isótopos estables y radiogénicos, así como su utilización en yacimientos minerales y modelos de depósitos.

De igual forma se analizó la información bibliográfica y cartográfica preexistente sobre la zona de estudio.

3.2 TRABAJO DE CAMPO

En el desarrollo de la presente investigación fueron ejecutadas dos visitas de campo al área de estudio, previamente efectuado el reconocimiento de la misma. El objetivo de dichas visitas fue en primera instancia la elaboración de la cartografía (a escala 1:500) de catorce (14) labores mineras subterráneas, representativas del área de estudio, alineadas en una tendencia aproximada norte-sur, que coincide con el tren principal de mineralización de la zona.

La cartografía realizada permitió ubicar espacialmente todas las observaciones de campo, dimensiones, tipo y disposición de las zonas mineralizadas, rasgos

estructurales (diaclasas, fallas, direcciones de estratificación, etc.), alteraciones hidrotermales, tipo de roca encajante, así como ubicación de muestras.

El trabajo de campo comprendió también la realización de estaciones de reconocimiento geológico en superficie, en las zonas donde hay afloramientos de roca, con el objetivo de describir los principales rasgos de las unidades aflorantes, mineralogía y alteraciones hidrotermales, así como la toma de muestras de roca para la elaboración posterior de los análisis.

La combinación de la cartografía de labores subterráneas con las estaciones de reconocimiento de superficie, permitió la elaboración de un mapa geológico preliminar del área.

Las muestras colectadas en campo fueron registradas en su totalidad en una libreta con un número consecutivo que las identifica de manera única, dicha libreta presenta además una descripción espacial del sitio de toma, incluyendo coordenadas, así como la descripción de las características propias de cada muestra y el (los) propósito (s) para el (los) cual (es) fue colectada. El número total de muestras recolectadas en toda el área de estudio fue sesenta y nueve (69).

3.3 TRABAJO DE LABORATORIO: PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y REALIZACIÓN DE ANÁLISIS

Esta fase metodológica consistió en primera instancia en la preparación de las secciones delgadas pulidas y secciones delgadas para la elaboración de análisis petrográficos, metalográficos y de microsonda electrónica. Igualmente se seleccionaron muestras para la elaboración de secciones delgadas doblemente pulidas, indispensables para la elaboración de los análisis microtermométricos y de espectroscopía Raman.

Muestras de zonas alteradas hidrotermalmente fueron seleccionadas para la elaboración de los análisis de isótopos estables de O e H y se escogieron muestras de sulfuros para la ejecución de análisis de S.

Una vez preparadas las secciones delgadas pulidas y doblemente pulidas, se procedió a efectuar el trabajo de petrografía de mena, ganga y alteraciones, así como la petrografía de inclusiones fluidas y la medición de los parámetros microtermométricos. Dicho trabajo fue ejecutado en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Las muestras seleccionadas para la elaboración de los análisis isotópicos fueron enviadas a los laboratorios de la Universidad de Salamanca (España), del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y de la Universidade de São Paulo (Brasil).

3.4 TRABAJO DE OFICINA

El trabajo de oficina, la última etapa metodológica realizada, consistió en el procesamiento y el análisis integrado de toda la información obtenida para la elaboración del informe final, dando cumplimiento a los objetivos propuestos.

4. TRABAJOS PREVIOS

El departamento de Antioquia fue hasta hace algunos años el principal productor de oro en Colombia, las actividades extractivas de este metal se remontan a las crónicas españolas de las cuales se obtienen algunas citas fragmentarias y con poca continuidad histórica, en las cuales sin embargo, se hace referencia a la minería de algunos de los distritos mineros de este departamento. Entre las referencias bibliográficas más destacadas se encuentran aquellas incluidas en el trabajo de Restrepo, 1937 (en Rodríguez & Pernet, 1983), de las cuales se concluye que algunas de las explotaciones de oro más importantes, tanto de filón como de aluvión, correspondieron a los aluviones del río Nechí y Cauca, así como a las labores mineras de Titiribí, Santa Rosa de Osos, Amalfi, Remedios y Segovia.

Con base en la información histórica en la que se recopila algo acerca de la localización y características de las labores mineras del departamento de Antioquia, fueron realizados los primeros estudios encaminados a realizar un inventario de las características de estas explotaciones, entre los que se resalta el Mapa Minero de Antioquia producido en 1942, a partir del censo minero llevado a cabo entre 1936 y 1941 (Rodríguez & Pernet, 1983). Posteriormente, con base en la integración de información geológica y minera, aparecieron nuevas publicaciones entre las cuales se destacan “Recursos Minerales de parte de los Departamentos de Antioquia y Caldas” (Hall et al.,1970), “Recursos Minerales de Colombia” (Ingeominas,1987), el “Mapa Geológico del Departamento de Antioquia” (González, 1999) y “Recursos Minerales de Antioquia” (Rodríguez & Pernet,1983).

Estos últimos trabajos, en particular el de Rodríguez & Pernet (1983), haciendo uso de las características geológicas y estructurales de las diferentes regiones del departamento de Antioquia, así como de las características genéticas, mineralógicas y litológicas de los diferentes depósitos minerales conocidos,

proponen su división en tres regiones: Occidental, Central y Oriental, las cuales a su vez, se subdividen en diferentes distritos mineros. Dentro de cada uno de estos distritos, se hace una descripción de las generalidades de las diferentes minas, prospectos y manifestaciones minerales, que no solo incluyen metales preciosos sino también metales base e incluso materiales industriales y de construcción.

La zona de estudio, está enmarcada dentro de la Zona Oriental de Rodríguez & Pernet (1983), en el Distrito Minero de Puerto Berrío-Maceo-Puerto Triunfo, cuyo límite al norte está marcado por una línea que bordea los afloramientos calcáreos del río Alicante y caño La regla hasta el río Magdalena y hacia el sur por los límites que demarcan la zona oriental.

La minería de oro en este distrito ha ocupado un renglón secundario, debido a la presencia de mineralizaciones aparentemente mejores en otras zonas del departamento, sobre todo hacia el norte, en donde se localiza el distrito minero de Segovia, el principal productor de este metal en el país.

Los estudios existentes hasta la fecha incluyen solamente referencias de algunas mineralizaciones vetiformes ubicadas hacia el oriente de la zona de El Vapor, emplazadas aparentemente en rocas de composición diorítica a cuarzo-diorítica, de probable edad Jurásica y correlacionables con el Batolito de Segovia.

En el año 2002, Proingecom Ltda., en cumplimiento de un contrato con MINERCOL, realiza la cartografía tanto superficial como subterránea de las labores mineras existentes hasta ese momento, en la zona norte del área de El Vapor y establece un plan de integración minera, principalmente enfocado a realizar un cálculo de recursos y a mejorar el beneficio y la extracción mineral.

No existe ningún estudio publicado que describa las características mineralógicas ni texturales o que pretenda dar luces sobre los procesos genéticos que originaron las mineralizaciones auríferas del área de El Vapor.

5. GENERALIDADES SOBRE LA ZONA DE LA ZONA DE ESTUDIO: UBICACIÓN Y ACCESO

La zona de estudio se localiza en el nororiente del Departamento de Antioquia en el flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia, al occidente del municipio de Puerto Berrío, distante aproximadamente 150 Km. de la ciudad de Medellín, geográficamente se encuentra ubicado entre las coordenadas planas (origen Bogotá) 937000 - 942000 sentido Este y 1196000 – 1209000 sentido Norte (**Figura 1**).

El acceso a las mineralizaciones de El Vapor es relativamente sencillo, el caserío se encuentra en el kilómetro 45 sobre la vía pavimentada que conduce desde el municipio de Puerto Berrío hacia la ciudad de Medellín, una vez allí, el ingreso a los sectores con desarrollo de actividades mineras se efectúa a pie por camino de herradura en dirección sur.

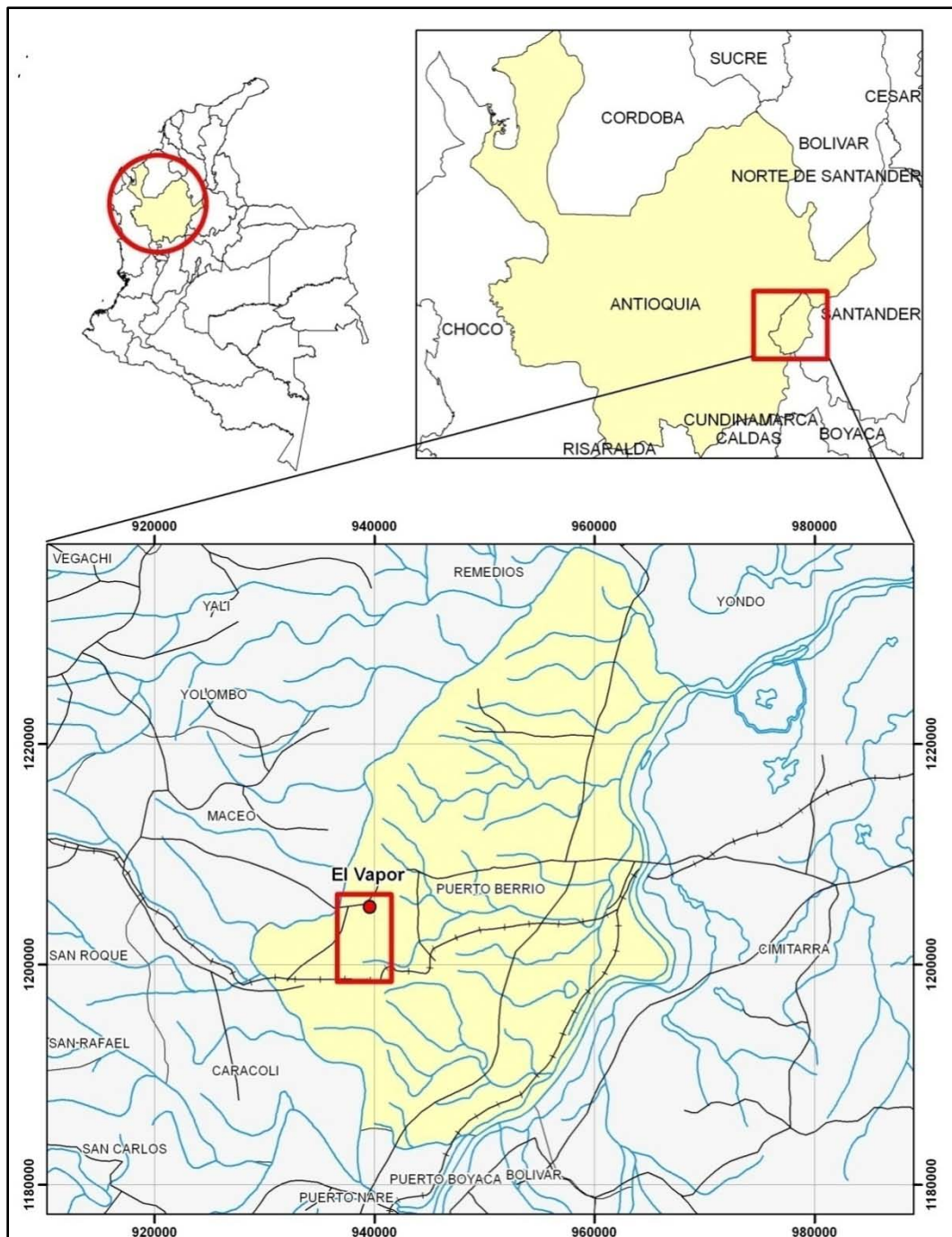


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

6. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El territorio colombiano constituye una región particularmente interesante en términos geotectónicos, pues la compleja interacción de las placas de Nazca, Caribe y Cocos ha producido rasgos morfodinámicos únicos, dominados por una tectónica dominada por grandes estructuras rumbodeslizantes activas en lo que se denomina el Bloque Andino (Pulido, 2003). La comprensión de los procesos geodinámicos que han conducido a la configuración actual de los Andes del Norte, ha sido objeto de una buena cantidad de trabajos en los últimos años (Restrepo & Toussaint, 1988; Restrepo-Pace *et al.*, 1997; Cediel *et al.*, 2003; Vinasco *et al.*, 2006; Ordoñez-Carmona *et al.*, 2006; Cardona *et al.*, 2010; Villagómez, 2011).

Actualmente se reconoce que la configuración de los Andes del Norte, en particular de la Cordillera Central de Colombia, es única en toda la cadena de los Andes, pues se encuentra constituida por rocas autóctonas pre-Cretáceo (terrenos Tahamí y Chibcha de Restrepo & Toussaint (1988) o “Subplaca Continental Central” de Cediel *et al.*, 2003) contra las cuales se acrecionó una serie de terrenos alóctonos y para-autóctonos desde el Cretáceo (Cediel *et al.*, 2003; Villagómez, 2011).

Datos recientes (Vinasco, 2006; Ordoñez-Carnoma *et al.*, 2006; Villagómez, 2011) dan cuenta de la edad y origen de las distintas unidades litotectónicas involucradas en la formación de la Cordillera Central y proporcionan un marco evolutivo aceptado por muchos autores.

Las rocas más antiguas en el proceso de evolución de la actual Cordillera Central están representadas por cuerpos fragmentados de granulitas y neises migmatíticos metamorfoseados durante la orogenia Greenvilliana – Orinoquense con edades entre 1300 y 900 Ma., que han sido reconocidas a lo largo del margen oriental de la Cordillera Central, en la Sierra Nevada de Santa Marta y los macizos de Santander y Garzón (Restrepo-Pace *et al.*, 1997; Ordoñez-Carmona *et al.*,

2006). La edad Greenvilliana obtenida para dichas rocas indica que fueron metamorfoseadas probablemente durante el comienzo del episodio de colisión entre la margen noroccidental de la placa Suramericana (Amazonia) y la margen suroriental de Laurentia (Restrepo-Pace *et al.*, 1997; Ordoñez-Carmona *et al.*, 2006), o tal vez representando fragmentos alóctonos con respecto al denominado “Escudo de Guyana”, provenientes de la placa Norteamericana (Cediel *et al.*, 2003).

Las rocas Greenvillianas del flanco oriental de la Cordillera Central se encuentran en contacto hacia el occidente con las rocas del terreno Tahamí (Restrepo & Toussaint, 1988) a lo largo de la falla Otú-Pericos.

Las unidades más antiguas reconocidas en el terreno Tahamí corresponden a los ortoneises de La Miel, cuyo protolito cristalizó en una edad máxima de entre 470 y 440 Ma. (Villagómez *et al.*, 2011) y que según dicho autor representan la continuidad más norte del cinturón magmático del Ordovícico tardío documentado en la Cordillera Oriental de Perú y que evidencian la presencia de una margen activa relacionada a la apertura del océano Rheico.

Un evento magmático de edad Pérmica está marcado por la intrusión de cuerpos graníticos sintectónicos, especialmente en el flanco oriental de la Cordillera Central y en la Sierra Nevada de Santa Marta, con edades U-Pb LA-ICP-MS entre 288 y 265 Ma. (Cardona *et al.*, 2010) y U-Pb Shrimp entre 280 y 250 Ma. (Vinasco *et al.*, 2006). Dichos cuerpos, junto con edades de metamorfismo en la Cordillera Central registrado en circones heredados en el “neis granítico de Abejorral”, son interpretados por dichos autores como evidencia de la colisión de Gondwana con Laurentia y formados por la probable subducción de la placa Pacífica por debajo de Pangea (Villagómez *et al.*, 2011).

Según Vinasco *et al.* (2006), la etapa inicial en la ruptura del supercontinente Pangea está reflejado en Colombia por la intrusión de stocks tardimagmáticos

alrededor de los 230 Ma. como el stock de Amagá, cuya geoquímica evidencia una derivación migmatítica.

El núcleo de la Cordillera Central de Colombia está conformado por rocas metasedimentarias y metamórficas de bajo grado, agrupadas regionalmente en el Complejo Cajamarca, con edades variables entre 240 y 220 Ma., depositadas durante el período de rifting que generó la ruptura de Pangea y en las cuales, la presencia de circones heredados indican una derivación Gondwánica del Cratón Amazónico, con edades del evento Sunsás y Brasiliano (Chew *et al.*, 2008 en Villagómez *et al.*, 2011).

La evolución tectónica durante el Mesozoico de la actual Cordillera Central está mejor estudiada y es claro, por la presencia de grandes batolitos (Ibagué, Mocoa y Segovia), que durante el Jurásico (~180 Ma) se estableció un arco magmático en la margen occidental de Suramérica que se mantuvo probablemente hasta los 145 Ma., momento en el cual cesó debido una migración progresiva hacia el océano de la zona de subducción, producto de la introducción de corteza continental menos densa (Villagómez *et al.*, 2011).

Aunque es discutido en la actualidad, algunos autores (Cooper *et al.*, 1995; Cedié *et al.*, 2003) indican la presencia de una tectónica extensiva de rift continental marcada por el depósito de rocas volcano-sedimentarias como las formaciones Girón, Noreán, La Quinta, Jordán y Saldaña, coexistente con el arco magmático que dio origen a los ya mencionados batolitos.

Durante el Cretáceo Temprano hacia el occidente de la proto Cordillera Central se produjo la sedimentación y el magmatismo del Complejo Quebradagrande y la generación de las rocas del Complejo Arquía en un ambiente de MORB, acrecionadas de manera conjunta contra el borde de Suramérica cerca de los 117 Ma (Villagómez *et al.*, 2011). Al mismo tiempo, hacia el oriente se produjo la ingresión marina que dio origen a la cuenca cretácica colombiana y al depósito de

rocas marinas someras en lo que hoy se conoce como el Valle del Magdalena y en la cuenca de los Llanos Orientales (Cooper *et al.*, 1995).

La subducción de la placa proto-Caribe por debajo de la placa Suramericana generó el establecimiento de un arco magmático representado por la intrusión del Batolito Antioqueño durante el Cretáceo tardío. La colisión de rocas generadas en un ambiente de plateau oceánico, pertenecientes a la denominada Gran Provincia Ígnea del Caribe, colisionaron contra la margen continental de Suramérica hace cerca de 75 Ma. (Villagómez *et al.*, 2011), produjo el cese de la actividad magmática en la Cordillera Central y la regresión del mar Cretáceo, generando el depósito de rocas de ambiente estuarino, de llanuras aluviales y llanura costera (Cooper *et al.*, 1995). La **Figura 2**, tomada de Villagómez *et al.* (2011) ilustra la reconstrucción tectónica para el Cretáceo de la margen noroccidental de Suramérica.

La subducción de la placa Nazca hacia el occidente generó el restablecimiento de un arco magmático en la Cordillera Central desde el Paleoceno, representado por el Batolito de Sonsón (Ordoñez-Carmona *et al.*, 2001 en Villagómez *et al.*, 2011), magmatismo que ha migrado hacia el occidente y está marcado por la intrusión del batolito de Piedrancha.

Finalmente, la acreción de los terrenos Cañasgordas y Baudó (Cediel *et al.*, 2003) o Chocó-Panamá (Duque-Caro, 1990) durante el Mioceno – Plioceno, produjo magmatismo calcoalcalino representado por los cuerpos intrusivos de Quinchía, Marmato y Buriticá entre otros, así como el inicio de la Orogenia Andina, es decir, la inversión y el levantamiento tectónico final de las cordilleras oriental y occidental de Colombia.

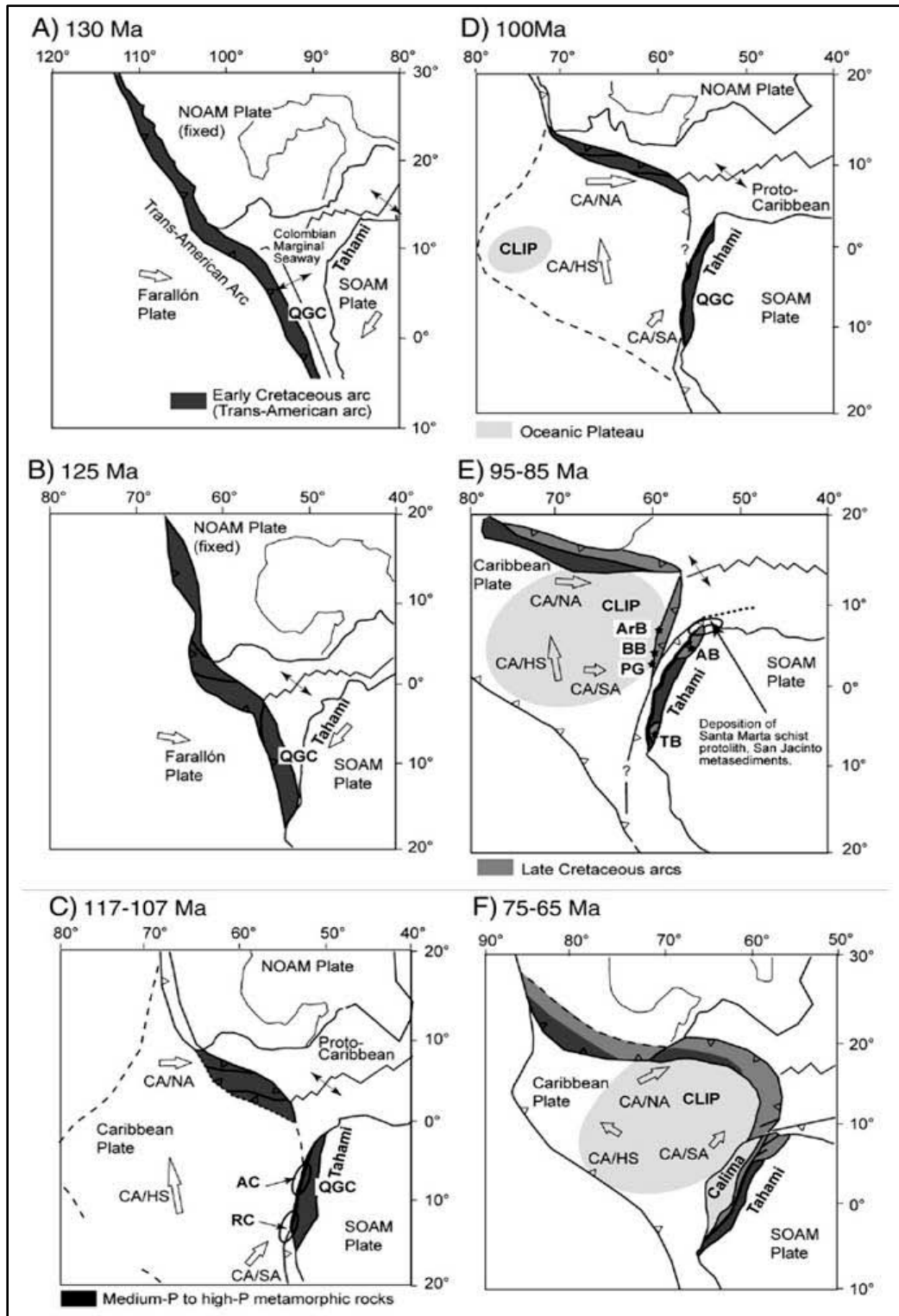


Figura 2. Evolución tectónica de la margen noroccidental de Suramérica durante el Cretáceo. Tomado de Villagómez *et al.*, 2011.

7. GEOLOGÍA LOCAL

El área de El Vapor se ubica en el denominado terreno Chibcha (Restrepo & Toussaint, 1988), al este del sistema de fallas de Palestina y de la falla Otú, que lo separa del terreno Tahamí. Esta zona, sobre el flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia corresponde a un área en la cual el basamento cristalino, constituido por rocas metamórficas Paleozoicas y Neoproterozoicas polideformadas, intruidas por cuerpos graníticos Jurásicos y Meso-Cenozoicos, ha actuado como un bloque rígido ante la deformación marcada por la convergencia de la placa de Nazca, que subduce desde el occidente y la colisión de la Cordillera Occidental y el bloque Chocó-Panamá.

En el área de El Vapor afloran rocas metamórficas proterozoicas, que corresponden a neises cuarzo - feldespáticos y que se prolongan desde la Serranía de San Lucas al norte (Bogotá & Aluja, 1981 en González, 2001), hasta el suroeste del municipio de Puerto Berrío, razón por la cual se le asigna la denominación de Neises Cuarzo Feldespáticos de San Lucas. Estas rocas constituyen una franja alargada del 50 Km. en sentido norte-sur, con un ancho promedio de 10 Km., limitada por bloques fallados, entre la Falla Otú al occidente y el Valle del Magdalena al oriente. Ordoñez *et al.* (1999), describen neises cuarzo feldespáticos milonitizados, generados probablemente a partir de rocas graníticas de composición félsica a intermedia, al parecer metamorfoseadas durante la orogenia Grenvilliana, evento datado en 899 ± 36 Ma. por el método Rb-Sr en roca total. Las rocas proterozoicas del área se encuentran parcialmente cubiertas por sedimentos más jóvenes e intruidas por el Batolito de Segovia. Predominan neises cuarzo- feldespáticos en los cuales se encuentran lentes de anfibolita y mármol.

El Batolito de Segovia, otra unidad que aflora en el área de estudio, se encuentra en el flanco este de la Cordillera Central y se extiende desde el norte del Departamento de Antioquia hasta la Serranía de San Lucas, Departamento de Bolívar (Kassem & Arango, 1977; Ballesteros, 1983, ambos en González, 2001).

Es un cuerpo alargado en sentido norte-sur, que coincide con el sentido tectónico regional; tiene una longitud de 270 Km. y un ancho en su parte central de 50 Km., con una extensión total de 760 Km², teniendo en cuenta los cuerpos correlacionables (González, 2001). El cuerpo principal está constituido por dioritas, con amplias variaciones texturales y composicionales gradacionales, en especial a cuarzodiorita y localmente a rocas más básicas, frecuentemente a gabros hornbléndicos.

Según González (2001), el Batolito de Segovia intruye neises cuarzo-feldespáticos del Proterozoico, aunque en la mayoría de los casos el contacto con esta unidad es tectónico, de dirección norte-sur a través de las fallas de El Bagre y Palestina. Al noreste y este de Segovia, sedimentitas y rocas volcánicas cretácicas reposan en discordancia sobre el intrusivo. En el sector occidental, la Falla Otú separa el batolito de metamorfitas paleozoicas.

El Batolito de Segovia en la región de Segovia - Remedios, es la roca encajante de los filones de cuarzo auríferos que se explotan en el área y que se extienden hasta el sur de Bolívar. La edad de este cuerpo es de 160 ± 7 m.a. por K/Ar en hornblenda (Feininger et al., 1972).

Las rocas sedimentarias presentes en el área de El Vapor, corresponden a las denominadas "Sedimentitas al Este de Segovia" (González, 2001), las cuales se encuentran relacionadas con rocas volcánicas básicas. Localizadas al este de la Falla Otú y de la población de Segovia, de donde toman el nombre, fueron descritas por Feininger *et al.* (1972) conjuntamente con otras sedimentitas del Cretácico, pero no existe una columna estratigráfica ni levantamientos detallados de la secuencia. Se extiende hacia el norte en la plancha de Liberia (González, 1992 en González, 2001).

En esta unidad, litológicamente predomina un shale carbonoso de color negro, que al meteorizarse toma un color grisáceo y que se encuentra estratificado con

limolitas, areniscas, conglomerados intraformacionales con fragmentos de shale negro, cantos de conglomerado cuarzoso, lodolitas y rocas volcánicas básicas, de color gris verdoso. Unos pocos lentes de caliza finogranular de color gris, ocurren interestratificados con los shales cerca a la Falla Otú. Estos lentes son delgados y alcanzan apenas un espesor de pocas decenas de metros (González, 2001).

Las localidades fosilíferas de esta unidad contienen restos, por lo general mal preservados y deformados. Los fragmentos de plantas, amonitas, pelecípodos y gasterópodos han sido asignados al Cretácico Inferior, con predominio de formas del Aptiano superior al Albiano inferior (Feininger *et al.*, 1972).

Las estructuras más importantes del área de El Vapor corresponden al sistema de fallas de Palestina, un sistema polifásico, activo durante el Paleozoico y que se interpreta como la sutura entre los terrenos Chibcha y Tahamí (Toussaint, 1993 en González, 2001, Cediel *et al.*, 2003). Según Feininger (1970) este sistema de fallas estuvo activo durante el Paleozoico medio a tardío y su reactivación se produjo probablemente durante el Cretácico temprano y tardío.

Para todas las fallas del sistema Palestina se reconocen tres rasgos comunes: un movimiento dextralateral en rumbo, evidencias de cizallamiento, incluyendo la presencia de milonitas, harina de falla, brechas de falla, presencia de bloques de rocas exóticas y convergencia hacia el sur con el sistema de Romeral (Cediel *et al.*, 2003).

Dentro de este sistema de fallas, las estructuras más importantes para el área de El Vapor corresponden a las falla El Nús y El Bagre, dos estructuras transcurrentes dextrolaterales con dirección N10-N20E, la primera de las cuales coloca en contacto las “Sedimentitas de Segovia” con el Batolito de Segovia y la segunda las ubica contra los “Neises Cuarzo-Feldespáticos de San Lucas”.

8. RELACIONES DE CAMPO: ROCAS ENCAJANTES, CONTROLES DE MINERALIZACIÓN Y TEXTURAS DE LAS MINERALIZACIONES AURÍFERAS DEL VAPOR, ANTIOQUIA

8.1 INTRODUCCIÓN

Establecer la relación que existe entre las rocas caja y las zonas mineralizadas en un depósito mineral, es tan importante como describir adecuadamente sus rasgos genéticos. Los controles y texturas de mineralización son factores descriptivos importantes, en muchos casos característicos de un tipo particular de depósito y que pueden estar ausentes en otros.

Este estudio es el primer análisis formal que integra información geológica de superficie y subterránea de las mineralizaciones auríferas de El Vapor con el objetivo de determinar los tipos de rocas encajantes, los controles de mineralización existentes y las texturas de las mismas.

8.2 METODOLOGÍA

Debido a la escasez de afloramientos en el área de El Vapor, producto de una alta tasa de meteorización combinada con una topografía de colinas suaves, las mejores exposiciones de roca fresca en el área se encuentran en la gran cantidad de labores mineras artesanales, que representan una excelente fuente de información geológica y estructural, un total de cuarenta (40) estaciones de campo con información geológica fueron levantadas. A pesar de que las labores mineras representan una excelente fuente de información, a lo largo del tren principal de mineralización identificado, la poca profundidad de las mismas no permitió la evaluación de posibles variaciones texturales y/o composicionales de las

mineralizaciones sino en dos de las tres dimensiones posibles. Lo anterior en cierta medida, limita el alcance de esta investigación.

Se efectuó el levantamiento semidetallado (escala 1:500) de un total de catorce (14) labores mineras subterráneas, efectuando en primera medida una poligonal abierta a cinta y brújula, sobre la cual se efectuó la cartografía geológica de las mismas, identificando la disposición y tipo de roca encajante, las zonas mineralizadas, así como la medición de datos estructurales que incluyen diaclasas, planos de falla y planos de estratificación.

En los pocos afloramientos de superficie que pudieron ser encontrados y para determinar las relaciones de contacto existentes entre las unidades geológicas aflorantes en el área, se tomaron todos los datos geológicos pertinentes.

8.3 ROCAS ENCAJANTES

El único estudio publicado sobre las mineralizaciones auríferas de El Vapor (Proingecon, 2003) indica que las zonas mineralizadas del área se encuentran emplazadas dentro de shales negros de las Sedimentitas de Segovia, sin embargo, el trabajo de campo efectuado permitió reconocer que éstas se encuentran tanto dentro de las rocas sedimentarias de las Sedimentitas de Segovia, como en las rocas ígneas del Batolito de Segovia (**Figura 3**).

Así, las rocas encajantes de las mineralizaciones de El Vapor corresponden al oriente del trazo de la falla de El Nús, principalmente a shales de color negro intercalados con limolitas de color crema y paquetes decimétricos de arenitas cuarzosas de grano fino con presencia de laminación plano paralela delgada, mientras que al occidente se componen de dioritas y cuarzo-dioritas del Batolito de Segovia.

Un total de cincuenta y nueve datos (59) de direcciones de estratificación tomados en la zona de estudio muestran que las Sedimentitas de Segovia presentan una

tenencia principal en rumbo entre N10W y N20E (**Figura 6A**) con inclinación subvertical, frecuentemente a nivel de afloramiento se encuentran pliegues anticlinales asimétricos apretados, que dan cuenta de un régimen principalmente compresivo.

Microscópicamente las rocas pertenecientes a las Sedimentitas de Segovia están compuestas principalmente por una matriz de color oscuro bituminosa, en ocasiones al parecer transformada en grafito, que envuelve granos redondeados y elongados de cuarzo y cristales de moscovita. En la mayoría de los casos, especialmente en cercanías al trazo de la falla de El Nús, los fragmentos de esta unidad embebidos en las vetas de cuarzo, presentan sombras de presión y colas de deformación que indican una textura augen producto de milonitización (**Figura 4**).

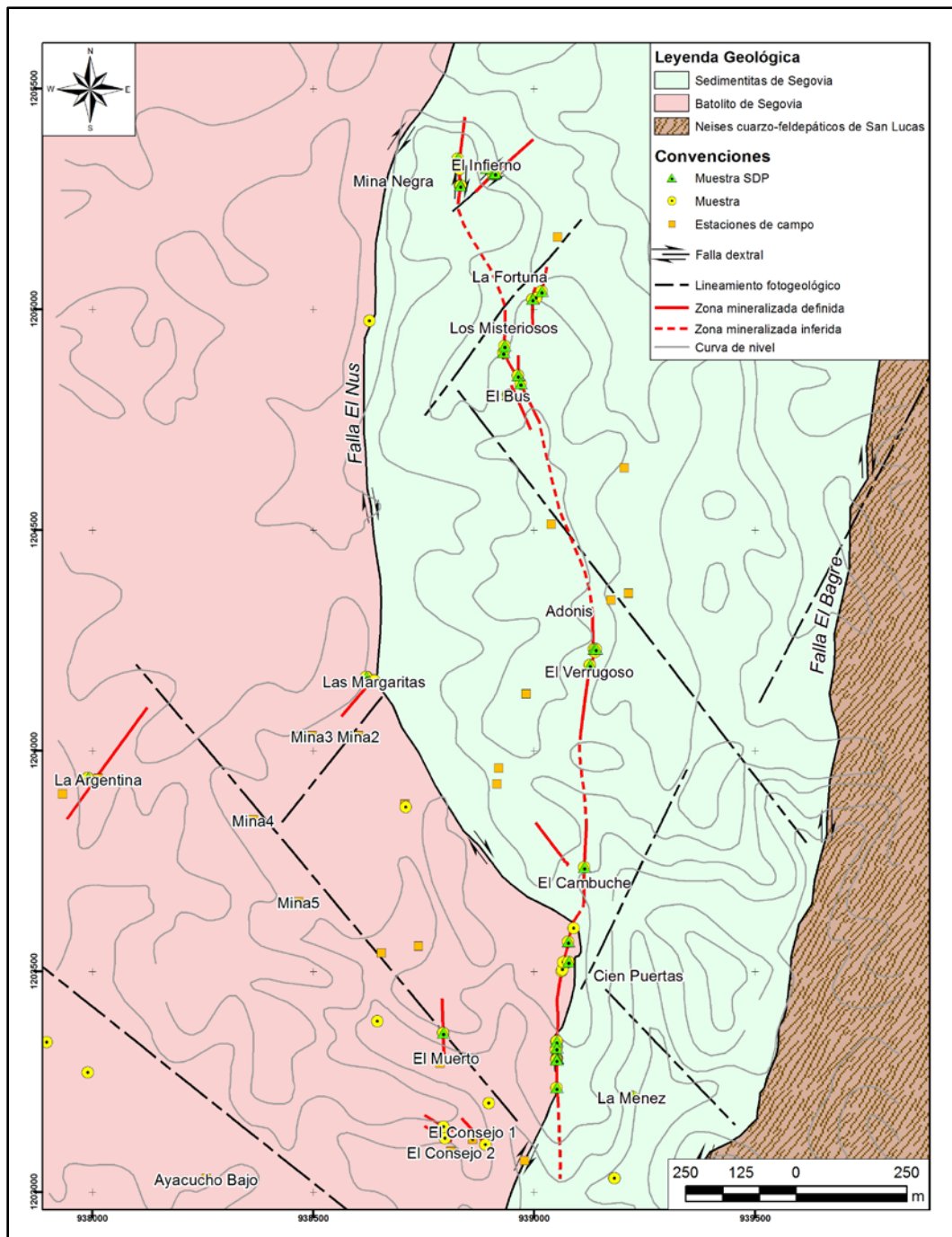


Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio.

Cerca a las zonas mineralizadas, en los respaldos de las mismas y como será descrito con más detalle adelante (Cap. 9: Alteraciones hidrotermales), es muy frecuente encontrar pirita de grano fino a muy fino, que marca un proceso de piritización en la roca caja.

Las granodioritas, dioritas y cuarzo-dioritas del Batolito de Segovia en la zona de estudio, corresponden a rocas de textura fanerítica de color blanco a gris verdoso compuestas por cristales de tamaño variable entre 1 y 5mm de hornblenda (25-50%), biotita (15-35%), plagioclasa (35-45%), con cantidades variables de cuarzo (5-20%), este último en ocasiones en proporción mayor a lo habitual, debido a un proceso de silicificación. En algunas de las muestras analizadas es posible encontrar cristales subhedrales de feldespato potásico de aspecto sucio con alteración a caolín y sericita, cuyo tamaño en la mayoría de los casos supera 1mm, sin presencia de maclas, fuertemente fracturados y que en ocasiones alcanzan hasta un 12% del total de los minerales presentes. Las diferencias en el contenido de los minerales constituyentes hace evidente la presencia de variaciones composicionales dentro de esta unidad.

Las rocas de Batolito de Segovia son más reactivas al proceso de mineralización en El Vapor y es muy frecuente encontrar minerales de alteración hidrotermal, principalmente clorita, epidota y carbonato, desarrollados a partir de cristales preexistentes de hornblenda y plagioclasa, asociación característica de alteración propilítica (Cap. 2: Alteraciones hidrotermales). En los sectores en los cuales el Batolito de Segovia constituye la roca caja de las mineralizaciones del área, es frecuente encontrar además moscovita (illita?) y cuarzo, indicativos de alteración fílica.

En algunas labores subterráneas como La Menez, El Porvenir y El Infierno, (**Figura 3**) se encuentran diques compuestos por una roca de textura afanítica (aplítica?) de color blanco a gris claro (**Figura 5A**) de entre 50 cm y 5m de espesor, con una orientación preferencial N10E y N30W. Estas rocas son en la mayoría de los casos, concordantes con los planos de estratificación de los shales negros de las Sedimentitas de Segovia, pero en otros claramente discordantes.

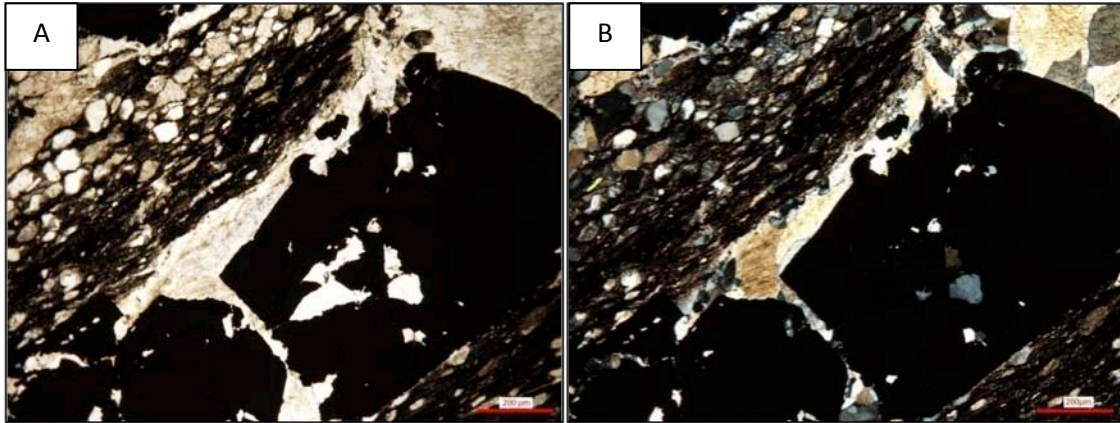


Figura 4. Fragmentos de shales de las Sedimentitas de Segovia embebidos dentro de una veta de cuarzo en El Vapor. A) PPL, B) PPX. Nótese la presencia de textura augen de cuarzo, indicativos de un proceso de milonitización sobreimpuesto. Sección 1442.

En la mayoría de los casos, las vetas se encuentran emplazadas entre estos diques y las rocas sedimentarias, lo que indica que éstas aprovecharon dichos planos de debilidad. Es claro en las relaciones de campo, que esta roca no presenta una relación genética con las mineralizaciones, pues es temporalmente anterior a ellas. En algunas labores mineras es posible observar como las mineralizaciones cortan, alteran, mineralizan y brechan dichos diques (**Figura 5**).

La mineralogía y textura original de los diques no es clara, pues presentan una fuerte alteración hidrotermal.

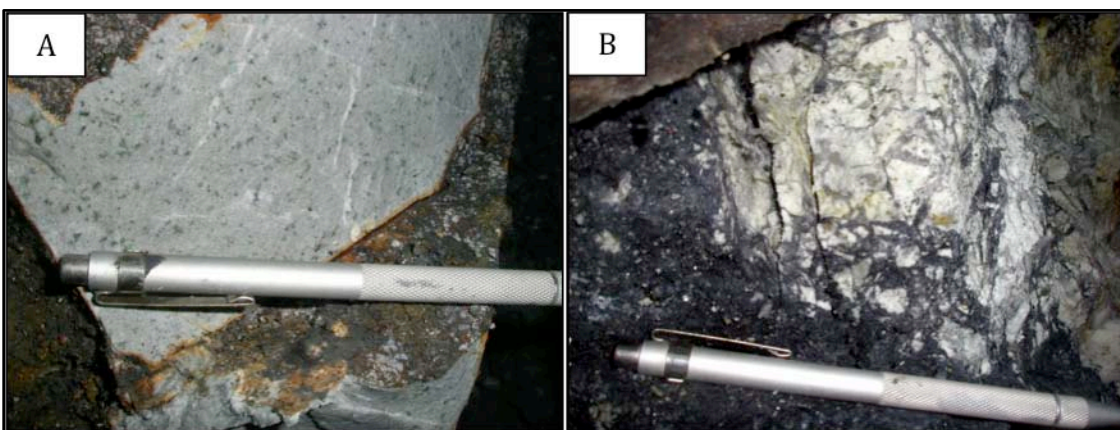


Figura 5. A) Detalle dique de textura afanítica fuertemente alterado que intruye las Sedimentitas de Segovia. Mina El Porvenir. B) Detalle dique alterado hidrotermalmente, cortado y brechado por vetillas de cuarzo, lo que indica que éste es anterior al evento de mineralización. Mina La Menez.

8.4 CONTROLES DE MINERALIZACIÓN

Las zonas mineralizadas en El Vapor se encuentran preferencialmente en cercanías al trazo de la falla El Nús y presentan una dirección entre N20W a N20E con una inclinación variable entre 25 y 90°, tanto hacia el oriente como hacia el occidente, que es claramente concordante con la dirección de la estratificación de las Sedimentitas de Segovia (**Figura 6**).

Sin embargo en algunos casos, especialmente en el sector norte y al oriente de la falla El Nús, es claro que las vetas cortan las rocas de caja a lo largo de zonas de fractura y cizallamiento menores, con dirección N30E, lo que puede estar relacionado con zonas de distensión relacionadas al movimiento conjugado en rumbo de las fallas El Nús y El Bagre (**Figura 3**).

El trabajo realizado permitió establecer, que en la zona de El Vapor existe un control de mineralización mixto, principalmente estratigráfico, relacionado con las zonas de debilidad que representan los planos de estratificación en las Sedimentitas de Segovia, pero también estructural, concerniente a zonas de fractura y cizallamiento desarrolladas en las unidades encajantes.

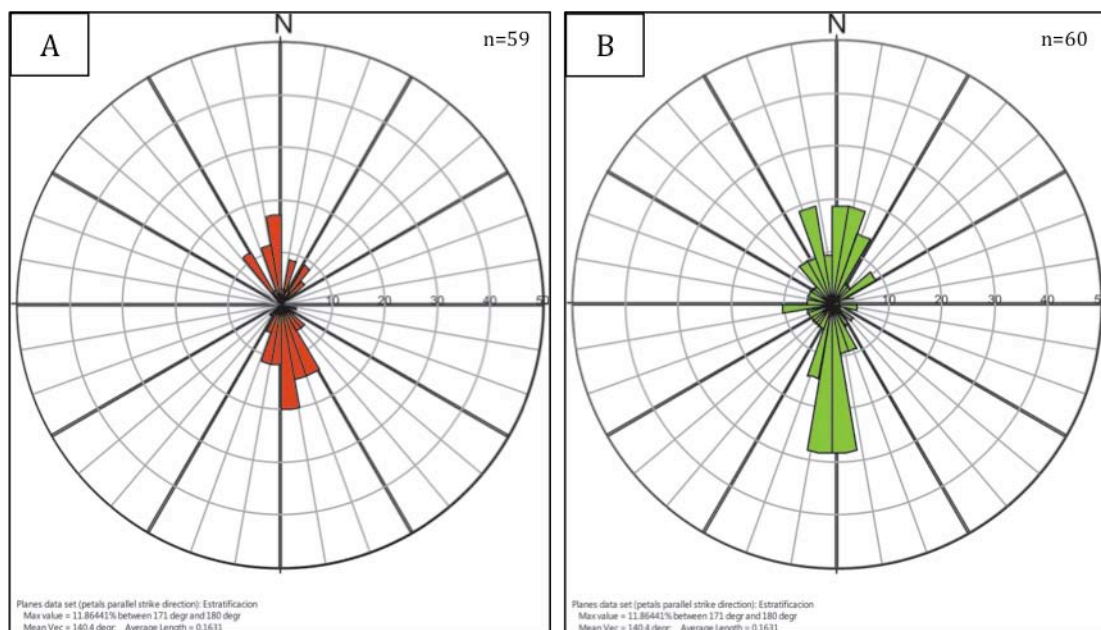


Figura 6. A) Diagrama rosa para cincuenta y nueve (59) datos de planos de estratificación en las Sedimentitas de Segovia y B) sesenta (60) datos de vetas, venas y vetillas encontradas en las labores subterráneas de la zona de estudio. Nótese la concordancia entre las tendencias de planos de estratificación y de zonas mineralizadas, indicativas de un control litológico de las mismas.

8.5 TEXTURAS DE MINERALIZACIÓN

En el área de El Vapor fue posible reconocer la presencia de dos sectores mineralizados con características ligeramente diferentes, relacionadas a la roca huésped.

Oriente de la Falla de El Nús:

Hacia el oriente del trazo de la falla de El Nús, el trabajo de campo permitió reconocer la presencia de un tren principal de mineralización, que es en general concordante con la dirección de los planos de estratificación de las Sedimentitas de Segovia, éste presenta una tendencia de rumbo entre N20E y N20W.

En esta zona, los trabajos mineros más importantes han sido llevados a cabo a lo largo del tren principal de mineralización en una distancia de aproximadamente 2

Km, desde el sector de El Consejo al sur (minas La Menez, Cien Puertas), hasta el sector conocido como La Banca en el norte (minas El Porvenir, El Infierno, La Fortuna), pasando por las minas El Cambuche, El Verrugoso, El Bus, Los Misteriosos y La Fortuna, hacia el centro de la zona de estudio. Aunque los trabajos mineros no se comunican entre sí, su ubicación a lo largo del rumbo del tren de mineralización, permite inferir que en el área éste presenta por lo menos esta dimensión.

Hacia el sur de la zona de estudio, en los sectores de las minas La Menez y Cien Puertas, el tren principal de mineralización se extiende por una longitud aproximada de entre 250 y 300 metros. En estos lugares, las zonas mineralizadas presentan rumbo variable entre N-S y N20E, con inclinación hacia el E.

En la mina La Menez es posible observar que la veta principal del tren de mineralización se encuentra encajada dentro de dioritas del Batolito de Segovia y hacia el norte atraviesa shales negros de las Sedimentitas de Segovia. En este sector las mineralizaciones están representadas por una veta principal con un espesor variable de entre 15 y 50 cm, acompañada de numerosas vetillas sinuosas, sigmoidales, discontinuas, de espesor variable entre 1 y 5 cm, con halo de alteración de arcillas y cuarzo + sericita, centimétrico, acompañado de sulfidización de la roca de caja. Las mineralizaciones son en la mayoría de los casos concordantes con la estratificación de los shales de las Sedimentitas de Segovia.

En La Menez se observa zonación mineralógica incipiente, marcada por la presencia de pirita finogranular diseminada hacia los respaldos de las estructuras, seguida por agregados masivos de cuarzo lechoso y sulfuros, que alcanzan hasta un 15% en algunos casos y que exhiben una textura brechoide (**Figura 7A**). Hacia el centro de la veta principal es posible encontrar estructuras drusiformes de cristales de cuarzo hialino con textura en peine que alcanzan de forma individual los 2cm y que rellenan espacios abiertos.

En el sector de la mina Cien Puertas, la mineralización corresponde a una veta principal con un espesor variable entre 10 y 30 cm aflorante con un contenido de sulfuros muy variable, desde menos del 5% hasta cerca del 15% (**Figura 7B**), encajada dentro de dioritas y cuarzodioritas del Batolito de Segovia, con halo de alteración argílica delgado, de unos pocos centímetros de espesor.

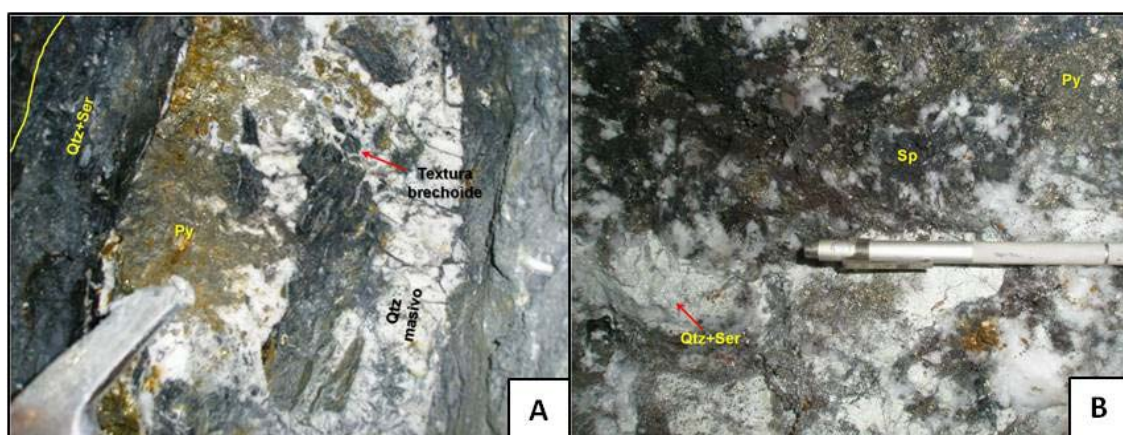


Figura 7. A) Veta de textura brechoide compuesta por agregados de cuarzo lechoso masivo y cristales de pirita de grano grueso, hacia los respaldos se observa un halo delgado de alteración cuarzo+sericita. Mina La Menez. B) Detalle de veta de 30cm de espesor, compuesta por agregados de cuarzo lechoso masivo con abundantes cristales de pirita de grano grueso y esfalerita, esta estructura presenta fragmentos embebidos de cuarzodioritas con alteración cuarzo+sericita pervasiva de intensidad fuerte. Mina Cien Puertas.

En la parte central de la zona de estudio (desde la mina El Cambuche hasta la mina La Fortuna), aunque no de forma continua, las mineralizaciones de El Vapor presentan una longitud estimada de 1000 metros. En estos sectores, las zonas mineralizadas presentan rumbo variable, controlado por la dirección de estratificación de las Sedimentitas de Segovia, entre N20E y N20W.

El sector central de las mineralizaciones de El Vapor (minas El Cambuche, El Verrugoso, El Bus, Los Misteriosos y La Fortuna) se caracteriza porque las mineralizaciones se componen de venas y vetillas sinuosas, discontinuas, anastomosadas, sigmoidales, con espesores individuales de entre 2 y 15cm, pero que forman enrejados de hasta 2m de espesor (**Figura 8**). Estas estructuras presentan por lo general, un contenido bajo de sulfuros, menor al 5%, pero en algunos casos estos pueden superar el 20%. En las minas El Bús y La Fortuna, es posible observar como la mineralización presenta un carácter brechoide, en el que

además se presentan texturas “cockade” con relleno de fracturas abiertas por cristales euhedrales de cuarzo.

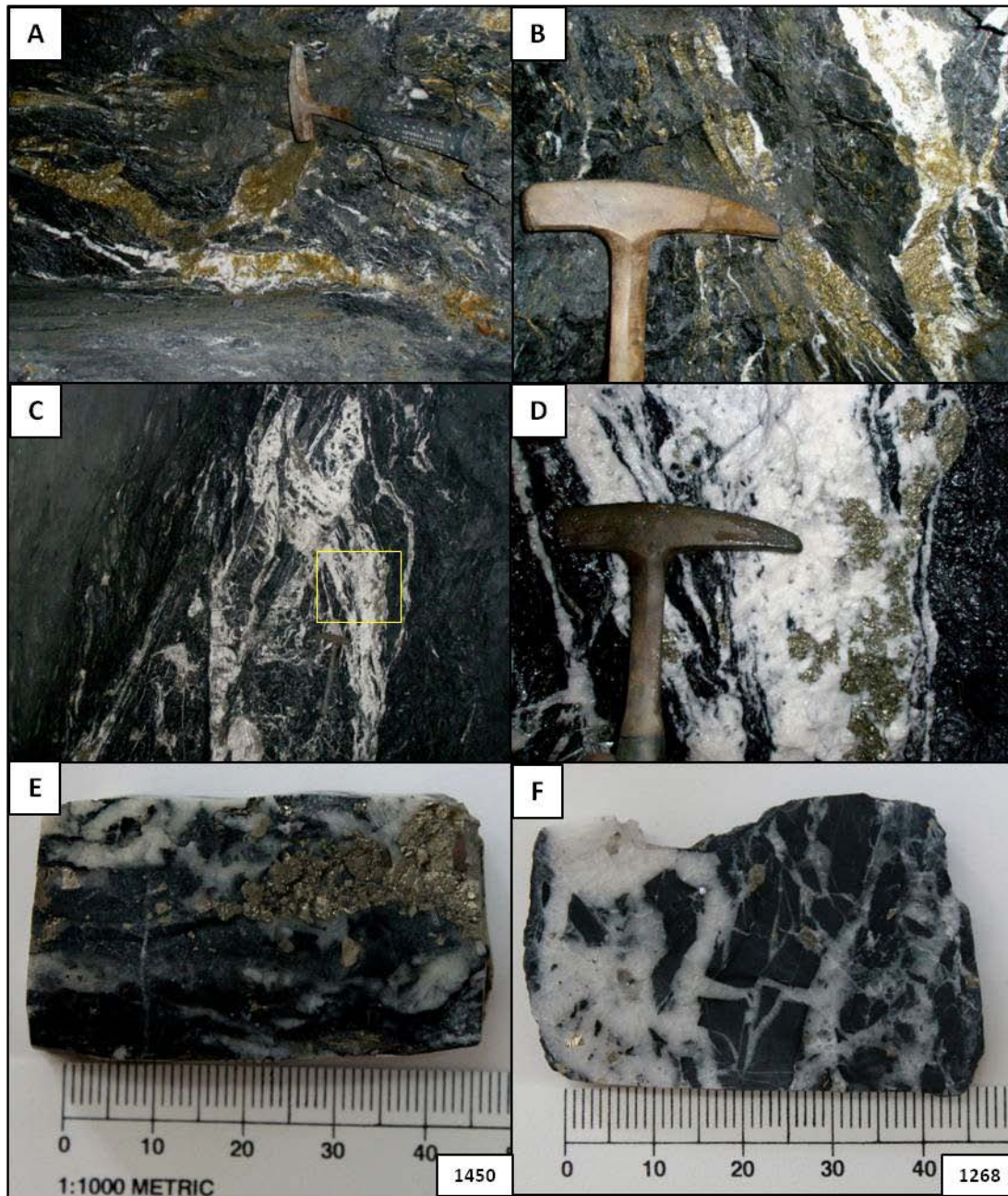


Figura 8. Venas y vetillas sinuosas, discontinuas, anastomosadas y sigmoidales de la parte central del tren principal de mineralización de El Vapor, encajadas en shales negros de las sedimentitas de Segovia y compuestas por agregados masivos de cuarzo lechoso y cristales de pirita gruesa. Nótese como el contenido de sulfuros es muy variable, alcanzando incluso el 20% en algunas zonas. A) y B), mina Los Misteriosos. C) y D) mina La Fortuna. E) y F) Testigos de secciones delgadas pulidas de muestras 1450 y 1268, provenientes de las minas El Bús y La Fortuna, respectivamente, que muestran texturas de mineralización brechoides.

La concordancia de las zonas mineralizadas con los planos de estratificación, corrobora la existencia de un control litológico sobre la mineralización, pese a lo cual, la discontinuidad y forma de las venas individuales, así como la apariencia brechoide de las mismas, embebiendo fragmentos de las rocas de caja, sugiere un carácter sin-cinemático, concordante con un control estructural.

Al igual que en la mina La Menez, en el sector central de la zona de estudio, las mineralizaciones presentan zonación interna incipiente con la presencia de sulfidización (pirita finogranular hacia los respaldos) de la roca de caja y halos de alteración que no superan los 50cm de arcillas y sericita + cuarzo, seguidos de la presencia de agregados de cuarzo lechoso masivo, sulfuros hacia la parte media y central. En algunos casos es posible observar la existencia de estructuras drusiformes de cuarzo en peine, que rellenan espacios vacíos. En general, la pirita de grano grueso se concentra hacia la parte central de las zonas mineralizadas.

Finalmente, en el sector conocido como La Banca, en la parte norte de la zona de estudio, las mineralizaciones de El Vapor, tienen una extensión cercana a los 150 metros, con dos direcciones principales en rumbo: N10E en la zona de Mina Negra y N40E en las minas El Infierno y El Porvenir.

En la mina El Porvenir, las mineralizaciones se caracterizan por corresponder a venas y vetillas sinuosas, sigmoidales, discontinuas, con halo desarrollo de un halo de alteración incipiente y con un espesor muy variable, entre 1 y 20 cm (**Figura 9A y B**). En este sector se presenta un fuerte control estructural relacionado a la presencia de planos de cizallamiento con rumbo N40E. En la mina Porvenir, al igual que en la zona central de la zona de estudio, se observa zonación mineralógica incipiente, con la presencia de pirita de grano fino hacia los respaldos, con una mayor concentración de sulfuros hacia la parte central, acompañada de agregados de cuarzo lechoso masivo.

En la mina El Infierno, ubicada hacia el norte de El Porvenir, como en la mayoría de los lugares estudiados, las mineralizaciones corresponden a venas centimétricas y vetillas sinuosas y discontinuas concordantes con los planos de

estratificación de la roca caja, sin embargo, en esta labor minera fue posible encontrar una zona de brecha hidrotermal matriz soportada con un espesor aproximada de 1.5m, en la que el cemento corresponde a agregados cristalinos masivos de cuarzo lechoso, acompañados de sulfuros (pirita, galena y esfalerita), que embebe fragmentos angulares de tamaño entre 1 y 15 cm tanto de shales negros, como de diques de textura aplítica (**Figura 9C y D**).

Las texturas de mineralización encontradas hacia el oriente de la falla de El Nús, sugieren la cristalización de forma sin-cinemática, en espacios abiertos con texturas brechoides, probablemente generados por la acción del movimiento de esta misma estructura, aprovechando además, los planos de estratificación de los shales negros de las Sedimentitas de Segovia. La forma y disposición de muchas de las estructuras mineralizadas sugiere además, deformación post cristalización, lo que es concordante con el fracturamiento observado en los cristales de pirita de grano grueso. Al igual que hacia el occidente de la falla de El Nús, hacia el final del proceso de depósito, la presencia de estructuras drusiformes rellenas con cristales bien desarrollados de cuarzo con textura en peine implican la cristalización lenta en condiciones fisicoquímicas relativamente estables.



Figura 9. A) Veta de cuarzo lechoso de 15cm de espesor, continua concordante con los planos de estratificación de las Sedimentitas de Segovia. Mina El Porvenir. B) Detalle de vetillas sinuosas discontinuas de cuarzo lechoso al parecer sin-cinemáticas, dentro de shales negros, en los que se ha desarrollado bitumen por acción de cizallamiento intenso. Mina El Porvenir. C) y D) Brecha hidrotermal compuesta por agregados cristalinos de cuarzo lechoso y sulfuros (pirita, galena y esfalerita). Nótese la presencia de fragmentos angulares de diques de textura aplítica de color gris con alteración Qtz+Ser pervasiva de intensidad fuerte y de shales negros. Mina El Infierno.

Occidente de la Falla de El Nús:

Durante el desarrollo de esta investigación fue posible identificar, que hacia el occidente del trazo de la falla del Nús las mineralizaciones de El Vapor se encajan dentro de dioritas y cuarzodioritas del Batolito de Segovia, en los sectores de La Argentina, Las Margaritas, El Muerto y El Consejo. En estos lugares las los sectores mineralizados se extienden por cerca de 100 m en dirección aproximada N40E y N-S en el caso de la mina El Muerto.

En las minas La Argentina, Las Margaritas, El Muerto y El Consejo, las mineralizaciones de El Vapor corresponden a vetas, venas y vetillas, sinuosas, continuas, con espesor variable entre 20 y 50 cm, con un halo de alteración

centimétrico, compuesto principalmente por arcillas (illita?). En estas zonas el contenido de sulfuros es muy variable, desde menos del 1% hasta el 20%.

Tanto en La Argentina como en Las Margaritas, la mineralización presenta un carácter zonado, con presencia de agregados masivos de cuarzo lechoso hacia los respaldos, mientras que los sulfuros ocupan la parte media de las zonas mineralizadas (**Figura 10A y B**). En algunos casos es posible observar, hacia la parte central, la presencia de estructuras drusiformes rellenas por cuarzo con textura en peine o “comb” (**Figura 10C**), con cristales individuales con tamaño entre dos y tres centímetros, pero que excepcionalmente superan los cinco.

En la mina El Muerto, cerca al trazo de la falla de El Nús, es posible encontrar además, abundantes vetillas y venas de cuarzo lechoso, con un porcentaje de sulfuros menor al 5% y un espesor de hasta 5 cm dispuestas en forma de “stockwork”, en una zona mineralizada de aproximadamente 1.2 metros de espesor (**Figura 10D**).

Las texturas de mineralización encontradas hacia el occidente del trazo de la falla de El Nús, son indicativas de la circulación constante y precipitación continua de minerales de mena y ganga en espacios abiertos, que en el caso del cuarzo con textura drusiforme, representan condiciones fisicoquímicas relativamente estables y probablemente una precipitación lenta. La evidencia de brechamiento de los minerales de mena, indica la existencia de un periodo de actividad tectónica importante, sin embargo, éste fue probablemente de menor intensidad que hacia el oriente de la falla de El Nús.

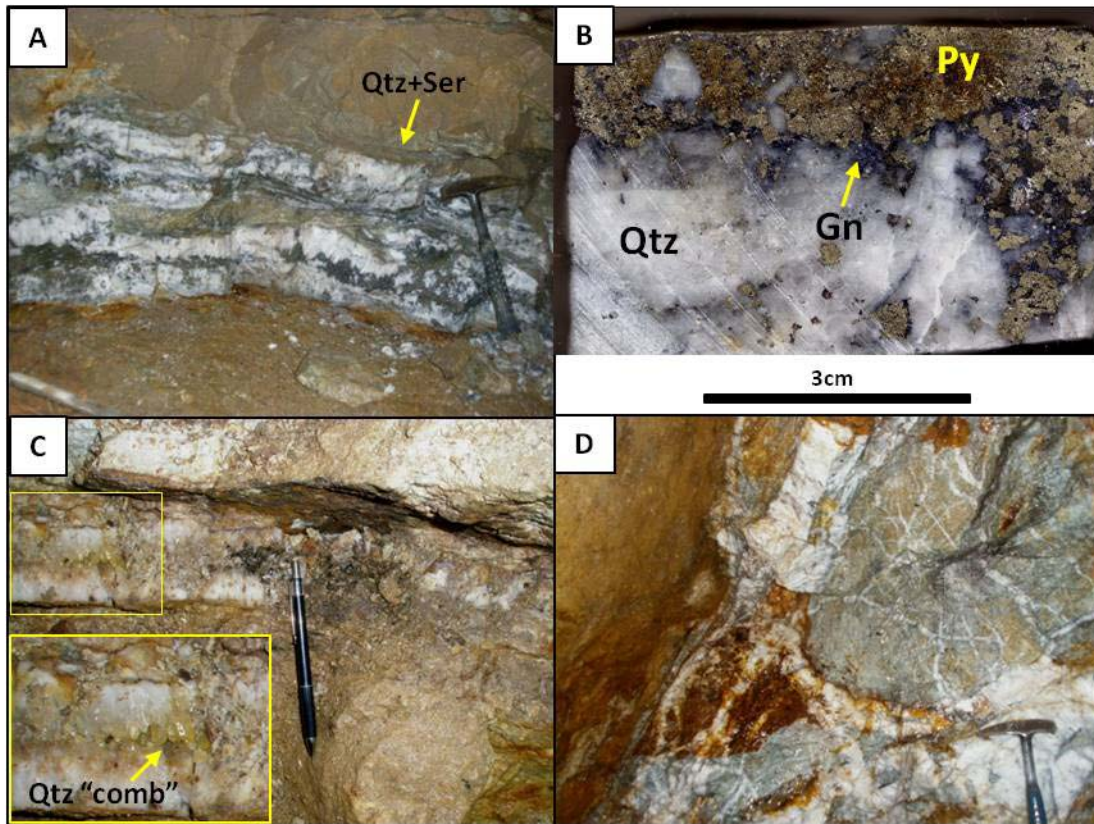


Figura 10. A) Veta de aproximadamente 30cm de espesor con zonación interna en la que los sulfuros se ubican hacia la parte media, mientras que el centro de la misma está rellena por cristales de cuarzo con textura en peine. Mina La Argentina. B) Detalle testigo de sección delgada pulida proveniente de la parte media de veta en la mina La Argentina. C) Vena de cuarzo lechoso con pocos sulfuros, que presenta cristales de cuarzo con textura en peine hacia el centro de la misma, relleno de cavidades, lo que es indicativo de su depósito en un evento tardío. D) Stockwork de vetillas de cuarzo lechoso dentro de cuarzodioritas del Batolito de Segovia. Mina El Muerto.

9. PETROGRAFÍA DE MENA Y GANGA, MICROQUÍMICA MINERAL Y ALTERACIONES HIDROTERMALES DE LAS MINERALIZACIONES AURÍFERAS DE EL VAPOR, ANTIOQUIA

9.1 INTRODUCCIÓN

La descripción adecuada de las características mineralógicas de un depósito mineral, permite efectuar inferencias con respecto a los procesos físico-químicos que le dieron origen. Así mismo, conocer cuál es la asociación mineralógica en un depósito dado, la descripción de los eventos de mineralización y su respectiva temporalidad relativa, es considerada en muchos casos como la columna vertebral con respecto a la cual se articulan todas las demás características del mismo, determinar a qué evento en particular está relacionado el depósito de oro, es de fundamental importancia para las labores extractivas.

La información presentada a continuación hace referencia a la descripción de las características mineralógicas obtenidas a partir del análisis petrográfico tanto de los minerales de mena como ganga y de los minerales de alteración hidrotermal relacionados con el proceso de generación de las mineralizaciones de El Vapor, así como de análisis de microsonda electrónica (EPMA) en distintos minerales. Se trata de información hasta ahora inexistente, que no ha sido publicada por ningún autor.

9.2 METODOLOGÍA

Tanto de las labores mineras subterráneas, como de los escasos afloramientos disponibles en superficie, fueron colectadas un total de sesenta y nueve (69) muestras durante la fase de campo, tanto de las rocas caja, como de las zonas mineralizadas, representativas de las características observadas macroscópicamente más importantes. A partir de dichas muestras se elaboraron treinta y tres (33) secciones delgadas pulidas (**Figura 11**) en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, utilizando técnicas tradicionales.

Las secciones delgadas pulidas fueron analizadas utilizando un microscopio Olympus BX-41 al cual se encuentra acoplada una cámara Infinity 1, en el laboratorio de microscopía y microtermometría de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Fueron escogidas ocho (8) secciones delgadas pulidas, representativas de las características de El Vapor, en las cuales se efectuó análisis de microsonda electrónica en los laboratorios de la Universidad de Oregon, Estados Unidos en un equipo Cameca SX100, junto con imágenes de microscopio electrónico de barrido, principalmente en granos de oro, pero también en cristales de pirita, esfalerita y galena, para conocer su composición química de manera cuantitativa.

Finalmente, para la identificación precisa de los minerales de alteración hidrotermal, fueron realizados análisis de difracción de rayos X en un difractómetro Siemens D-5000 con fuente de cobre, en los laboratorios del Servicio Geológico de los Estados Unidos en la ciudad de Denver, para lo cual se procedió a separar la fracción tamaño arcilla y preparar muestras orientadas por métodos convencionales.

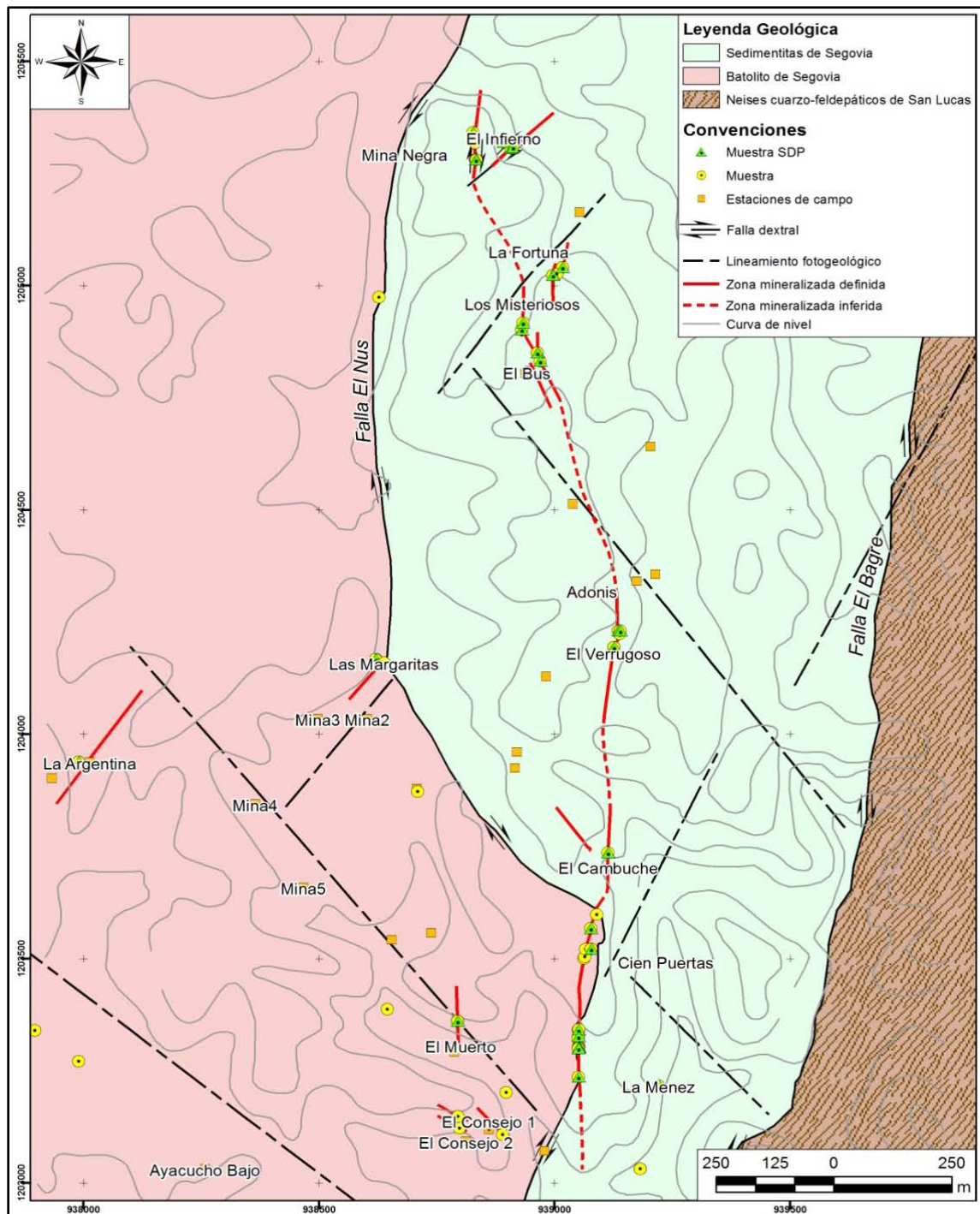


Figura 11. Mapa ubicación de secciones delgadas pulidas.

9.3 PETROGRAFÍA DE MENA Y GANGA EN EL VAPOR

La mineralogía de El Vapor es relativamente sencilla, siendo posible reconocer minerales de mena, ganga y de alteración con características distintivas, que permitieron establecer los eventos de mineralización, a ambos lados del trazo de la falla de El Nús.

9.3.1 MINERALOGÍA DE MENA

El principal mineral de mena encontrado en el depósito de El Vapor es pirita, que alcanza en algunos casos hasta un 17,5 % areal en las muestras analizadas. Dos tipos diferentes (generaciones) de este mineral, directamente relacionados con su temporalidad, con características texturales (tamaño y distribución) y asociaciones mineralógicas distintas pudieron ser identificados en El Vapor:

Pirita de grano fino:

Se encuentra como agregados y cristales individuales subidiomórficos, ocasionalmente idiomórficos con bordes rectos, color amarillo pálido e isotrópico bajo el microscopio, de tamaño pequeño, normalmente entre 15 y 20 μm , pero alcanzando en algunos casos las 200 μm . Este mineral se restringe a los respaldos de las vetillas, venas y vetas, por una extensión de no más de 50 cm (**Figura 12**). Esta generación de pirita presenta una distribución diseminada, particularmente en los shales negros de las Sedimentitas de Segovia, asociada con sericita y cuarzo de textura en mosaico de grano fino. De la misma forma, pirita de grano fino se encuentra dentro de fragmentos de las rocas caja, embebidos dentro de agregados de cuarzo masivo, en zonas donde las mineralizaciones presentan textura brechoide (desde La Menez hasta El Infierno).

La distribución de la pirita finogranular en las mineralizaciones de El Vapor, la ubica en un estadio pre-mineralización, que se interpreta como el resultado de la

primera reacción de los fluidos hidrotermales con las rocas caja generando sulfidización de las mismas, particularmente de los shales negros de las Sedimentitas de Segovia. La pirita de grano fino se presenta en menor proporción hacia el occidente de la falla de El Nús, probablemente debido a la menor reactividad de las dioritas y cuarzo dioritas del Batolito de Segovia.

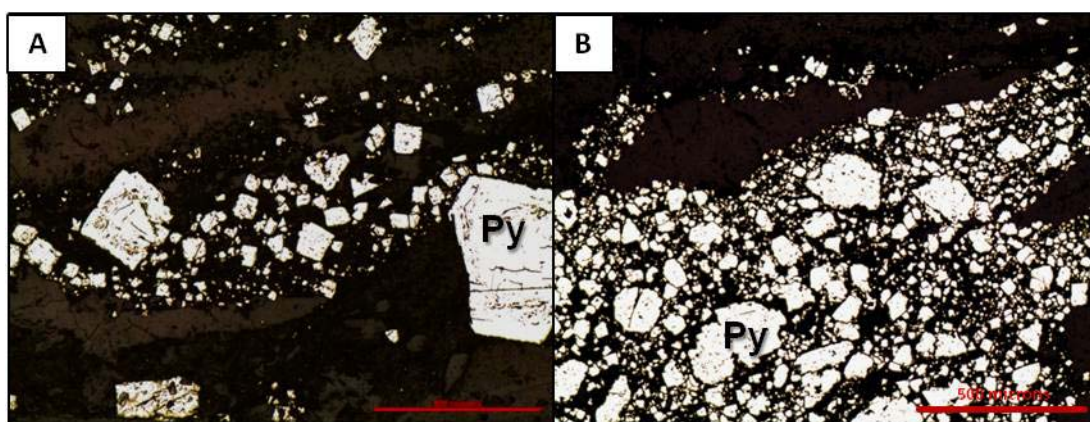


Figura 12. A) y B) Cristales subidiomórficos de pirita fina desarrollada hacia los respaldos de zonas mineralizadas. Secciones 1449 y 1450. Abreviaturas según Kretz (1983).

Pirita de grano grueso:

Una segunda generación de pirita puede encontrarse en las mineralizaciones de El Vapor, a ambos lados del trazo de la falla de El Nús. Corresponde a cristales idiomórficos a subidiomórficos con bordes rectos bien desarrollados, tamaño promedio entre 300 μm y 1mm, pero que en algunos casos excepcionales alcanzan hasta 1 cm de lado. Esta generación de pirita se encuentra asociada con agregados de cuarzo lechoso masivo, en forma de bandas hacia el interior de las vetillas, venas y vetas y en algunos casos hacia la parte central de las mismas (**Figura 13**).

Es frecuente observar al microscopio inclusiones sólidas pequeñas de esfalerita, calcopirita, galena y oro, indicativas de un crecimiento singenético con este mineral. De forma característica, los cristales de pirita de grano grueso se encuentran fuertemente fracturados, evidenciando eventos de cizallamiento posteriores a su formación. La ubicación de esta generación de pirita, hacia la parte media y central de las zonas mineralizadas, así como su asociación con

agregados de cuarzo masivo, la ubica en un estadio paragenético posterior a la pirita de grano fino.

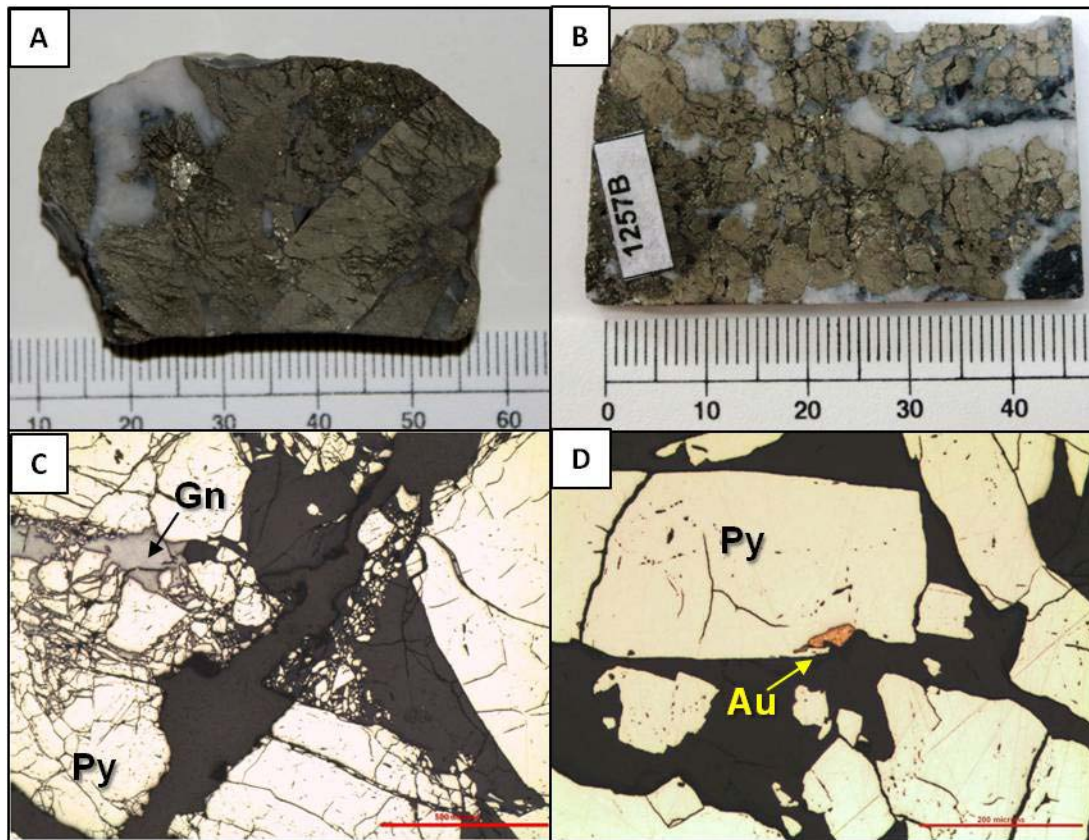


Figura 13. A) Cristales idiomórficos de pirita de grano grueso, con cristales excepcionalmente grandes que alcanzan hasta 1cm. Muestra 1415, mina La Menez. B) Agregado de cristales subidiomórficos de pirita de grano grueso con textura brechoide hacia la parte central de vena de cuarzo lechoso. Muestra 1257B, mina La Fortuna. C) Cristales de pirita de grano grueso con fracturas irregulares rellenas por galena, indicativo de una temporalidad tardía. Sección 1267, mina La Menez. D) Microfotografía de la sección 1257B, en la que se muestran cristales de pirita de grano grueso con inclusión de cristal de oro electrum. Abreviaturas según Kretz (1983).

Oro:

El oro, el mineral de interés económico en las mineralizaciones de El Vapor, es muy frecuente en las muestras analizadas, ópticamente se caracteriza por ser de color amarillo intenso, muy reflectivo, con presencia de rayas de pulido, con “luces” internas cuando es observado bajo luz polarizada. Aunque se observan algunas variaciones en la tonalidad de este mineral, en general el oro en las mineralizaciones de El Vapor presenta un color amarillo pálido, indicativo de que se encuentra en aleación con plata, por lo que se trata de oro tipo electrum.

Dos patrones texturales diferentes, junto con las asociaciones mineralógicas encontradas, indican dos estadios temporales de depósito diferentes.

En un primer evento de mineralización, partículas irregulares de oro electrum de tamaño generalmente pequeñas (entre 7 y 100 μm), se encuentran hospedados como inclusiones sólidas dentro de cristales de pirita de grano grueso, acompañando a inclusiones de galena, calcopirita, esfalerita y pirrotina (**Figura 14**). Es posible encontrar algunos granos de oro “libre” entre cristales de cuarzo de textura masiva. Los patrones texturales indican que en este primer estadio, el oro precipitó a partir del mismo fluido mineralizante que produjo la pirita de grano grueso y la generación de cuarzo masivo.

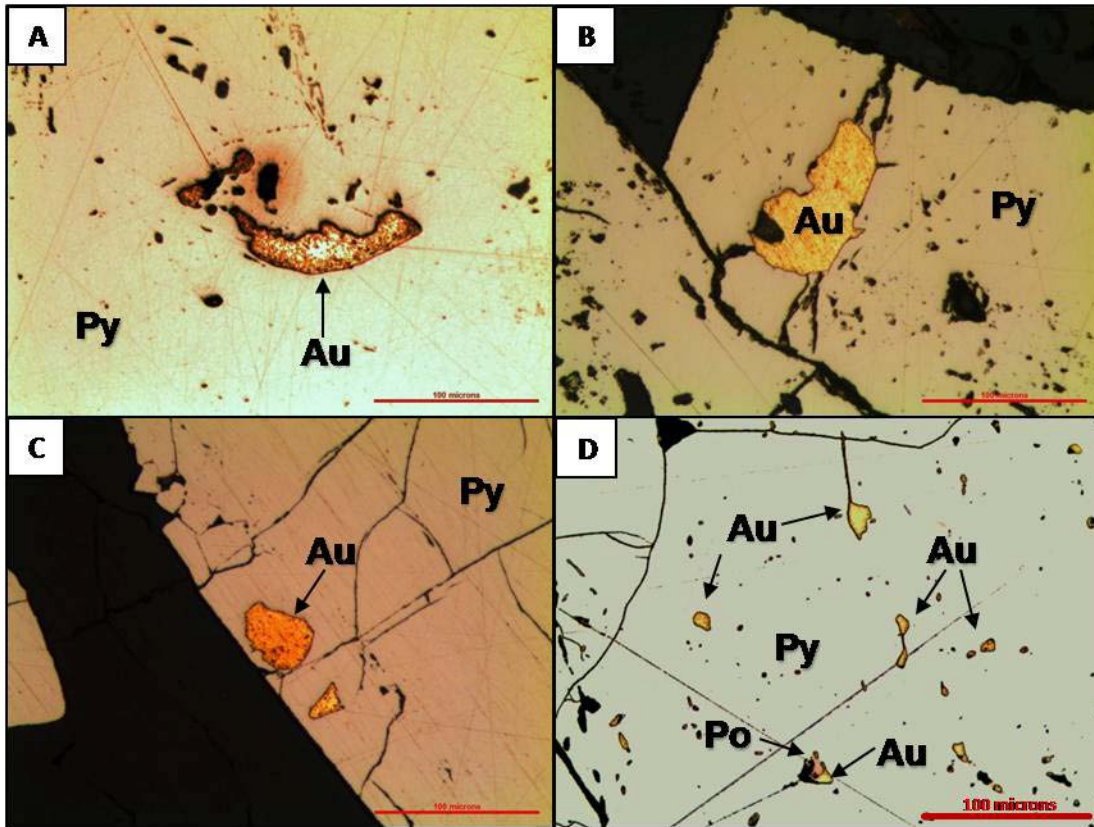


Figura 14. Cristales de oro de gran tamaño incluidos dentro de cristales de pirita de grano grueso, representativos del primer evento de mineralización identificado. A) sección 1429, mina Cien Puertas y B) sección 1437, mina El Cambuche, C) sección 1439, mina El Verrugoso y D) sección 1449, mina El Bus. En esta última fotografía se observa como las partículas de oro coexisten con pirrotina. Abreviaturas según Kretz (1983).

En el segundo evento de depósito las partículas de oro se caracterizan por presentar formas un poco más irregulares, un tamaño generalmente pequeño (20-100 μm), pero que en algunos casos alcanza hasta 250 μm . En este evento de mineralización las partículas de oro rellenan fracturas abiertas que cortan cristales de pirita de grano grueso, generalmente como acompañante de galena y calcopirita (**Figura 15**). En algunas muestras, oro electrum del segundo evento de mineralización se encuentra como inclusiones dentro de cristales subidiomórficos de esfalerita, acompañando a pequeñas gotas de calcopirita que conforman texturas de emulsión y exsolución (**Figura 15 F**).

En términos porcentuales, la mayor cantidad de partículas de oro encontradas en las secciones analizadas, es mayor en el segundo evento de depósito interpretado.

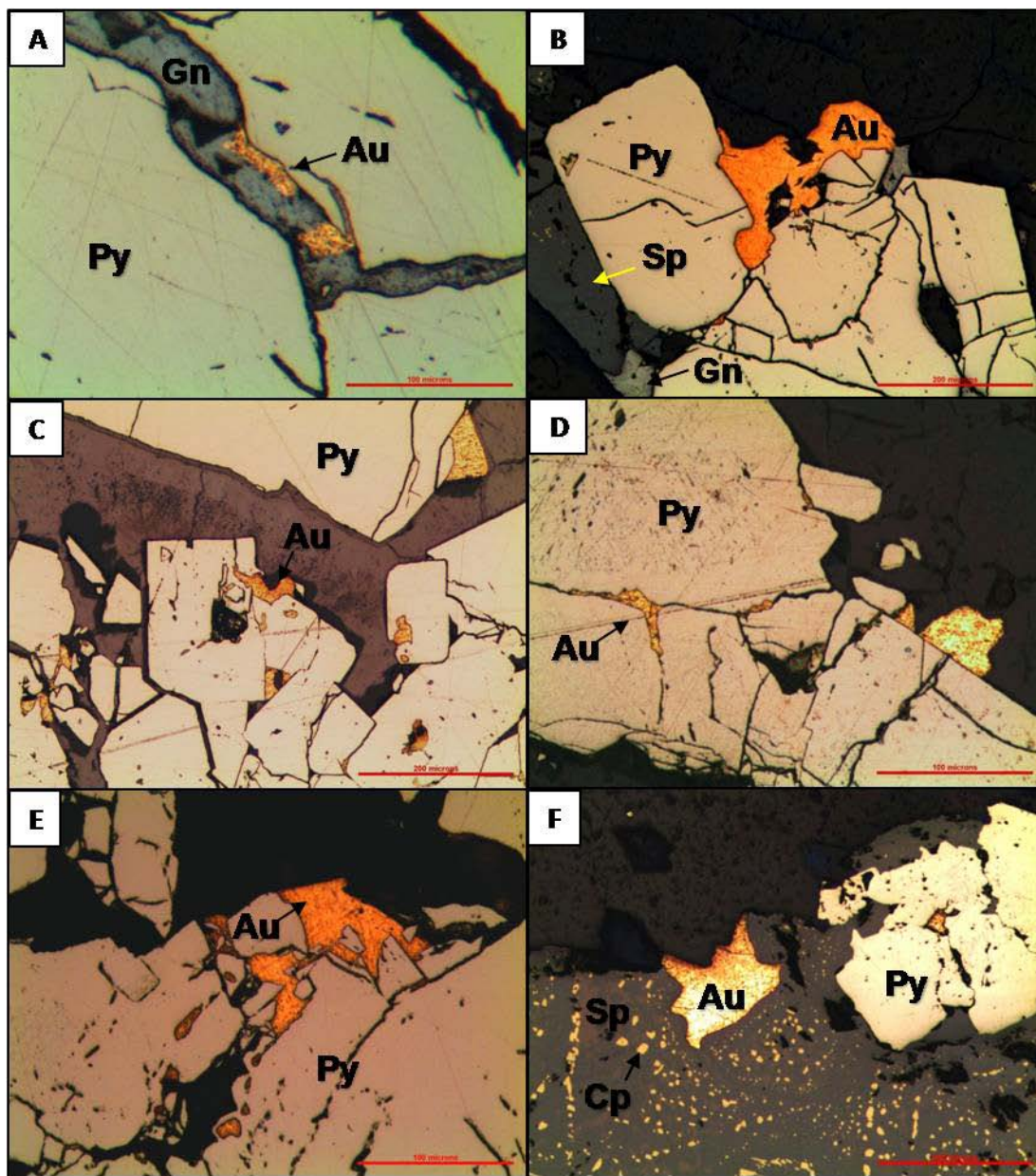


Figura 15. Microfotografías de cristales de oro que rellenan fracturas dentro de cristales de pirita de grano grueso, indicativo del segundo evento de mineralización identificado. A) y B) acompañante de galena y esfalerita, sección 1267, mina La Menez, C) y D) sección 1449, mina El Bus, E) sección 1439, mina El Verrugoso y F) sección 1401, mina La Argentina. Abreviaturas según Kretz (1983).

Galena:

Aunque la galena es un mineral que se encuentra de manera relativamente esporádica en las mineralizaciones de El Vapor (1% areal), fue reconocido en muestras provenientes tanto hacia el occidente del trazo de la falla de El Nús, como al oriente del mismo. La galena es un mineral importante particularmente por su frecuente relación con cristales de oro.

En las mineralizaciones de El Vapor, la galena se presenta con dos patrones texturales diferentes:

Como inclusiones sólidas redondeadas de tamaño pequeño (20 a 50 μm), color gris, sin huellas de exfoliación visibles, probablemente debido su tamaño, isotrópica al microscopio. Este patrón textural corresponde a un primer estadio de mineralización, en el que la galena se presenta de manera coetánea con cristales de pirita de grano grueso, a ambos lados del trazo de la falla de El Nús, tanto en los shales negros de las Sedimentitas de Segovia, como en las rocas de El Batolito de Segovia. En este estadio de mineralización, la galena se encuentra asociada con pirrotina, esfalerita y calcopirita (**Figura 16**).

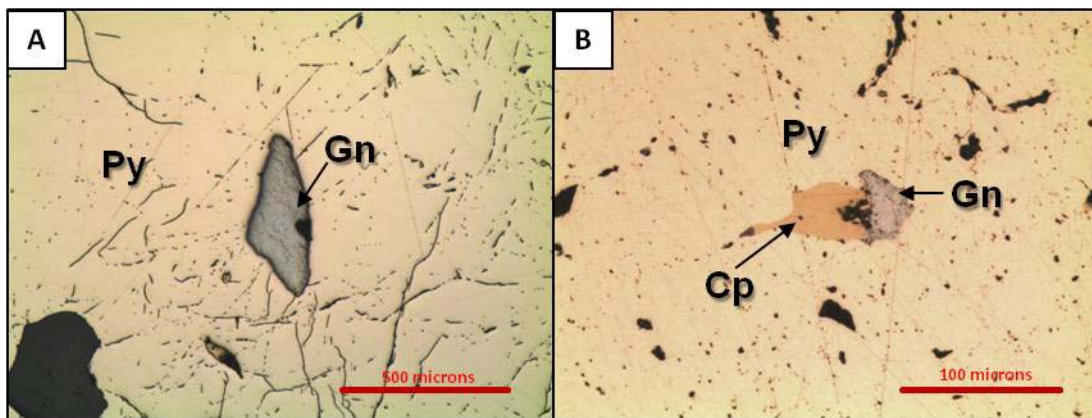


Figura 16. A) Inclusión sólida de galena dentro de cristal de pirita de grano grueso. Sección 1257 (A), mina La Fortuna. B) Inclusión sólida de galena coexistiendo con calcopirita dentro de cristal de pirita de grano grueso, indicativo de cristalización coetánea durante el primer evento de mineralización identificado. Sección 1251, mina El Bus. Abreviaturas según Kretz (1983).

Ocasionalmente se encuentran cristales de galena de tamaño entre 100 y 200 μm , intercrecida con cristales idiomórficos de pirita de grano grueso y cuarzo de textura masiva, indicando que pertenece al primer estadio de mineralización.

Una segunda generación de galena, porcentualmente más importante, se encuentra como cristales idiomórficos a subidiomórficos de mayor tamaño (entre cristales que rodean las 200 a 300 μm , hasta incluso tan grandes como 5mm), isotrópicos, con huellas de exfoliación (“pits” triangulares), que rellenan fracturas abiertas y cavidades, adoptando su forma, pero también embebiendo cristales de pirita de grano grueso (**Figura 17**). Cuando la galena presenta este patrón textural comúnmente se encuentra acompañada de calcopirita, esfalerita y cristales de oro.

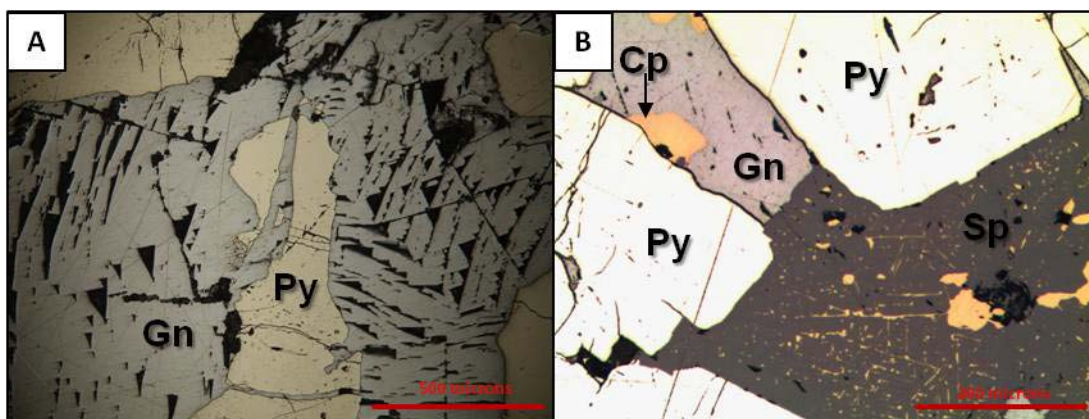


Figura 17. Segunda generación de galena identificada en las mineralizaciones de El Vapor, que rellena fracturas abiertas y embebe cristales de pirita de grano grueso, acompañada de calcopirita y esfalerita. A) Sección 1442, mina El Verrugoso y B) sección 1401, mina La Argentina. Abreviaturas según Kretz (1983).

Las texturas de depósito de la segunda generación de galena son indicativas de una cristalización en un estadio tardío dentro de la secuencia paragenética de las mineralizaciones de El Vapor. La presencia común de huellas de exfoliación o “pits” triangulares rotados y deflectados, sugieren eventos de deformación sobreimpuesta o por lo menos sin-cristalización.

Calcopirita:

Al igual que en el caso de la galena, aunque la calcopirita no es un mineral porcentualmente abundante en las mineralizaciones de El Vapor (pero sí reconocible en ambos lados del trazo de la falla de El Nús), es importante porque se encuentra claramente asociado a dos eventos de depósito, directamente relacionados a la presencia de oro.

El primer patrón textural identificado en la calcopirita de El Vapor, corresponde a inclusiones sólidas redondeadas de tamaño pequeño (15-25 μm) asociadas a esfalerita, galena y pirrotina, dentro de cristales de pirita de grano grueso (**Figura 18**). En este caso los cristales de calcopirita son de color amarillo intenso e isotrópicos bajo el microscopio.

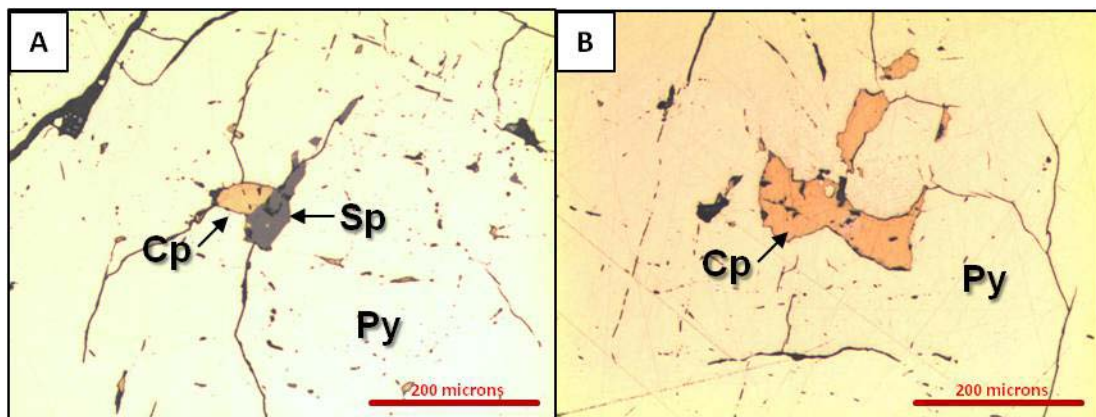


Figura 18. Inclusiones sólidas de calcopirita dentro de cristales de pirita de grano grueso, asociada con esfalerita, indicativas de crecimiento coetáneo con dicho mineral. A) y B), sección 1257(A). Abreviaturas según Kretz (1983).

Un segundo patrón textural, directamente relacionado con un segundo evento de depósito en El Vapor, es claramente identificable porque la calcopirita se encuentra como cristales subidiomórficos de tamaño mucho mayor (entre 200 y 300 μm en promedio, pero que puede alcanzar los 2mm), de color amarillo intenso, isotrópicos y que rellenan fracturas abiertas entre cristales de pirita de grano grueso y ocupan cavidades abiertas entre cristales de cuarzo masivo, de manera que adoptan la forma del espacio vacío (**Figura 19**). Cuando la calcopirita

se encuentra con este patrón textural, se encuentra siempre asociada con cristales de galena y esfalerita, así como con cristales de oro.

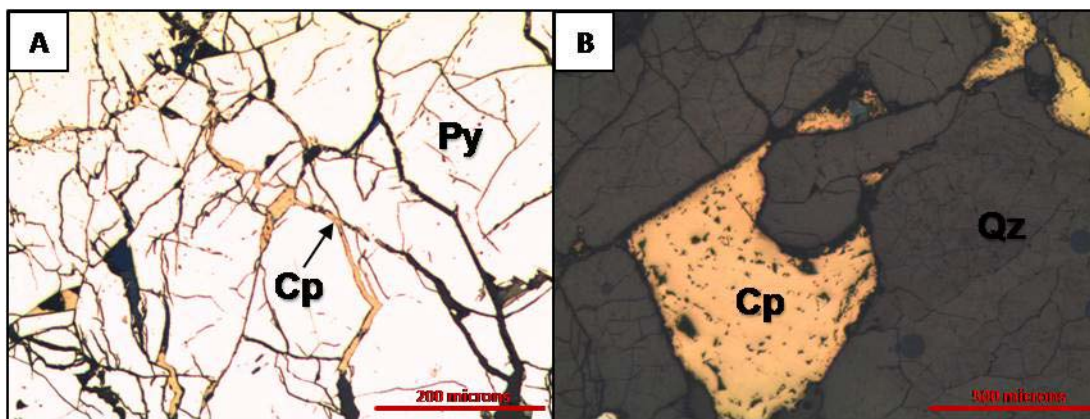


Figura 19. A) Calcopirita rellanando fracturas abiertas entre cristales de pirita de grano grueso, segundo evento de mineralización, B) cristal de calcopirita rellanando espacios vacíos entre cristales de cuarzo de textura masiva. Sección 1252, mina Los Misteriosos. Abreviaturas según Kretz (1983).

Un tercer patrón textural, aunque asociado al mismo evento de mineralización de la calcopirita que rellena fracturas y espacios vacíos, es la presencia de pequeñas gotas (1-50 μm) de calcopirita intercrecidas con esfalerita, ocasionalmente a través de planos cristalográficos en este mineral y constituyendo texturas de emulsión y exsolución, lo que es común, si se tiene en cuenta la afinidad geoquímica entre el cobre y el zinc.

Esfalerita:

De nuevo, como en el caso de la galena y calcopirita, aunque la esfalerita no es un mineral porcentualmente abundante (<1% areal) en las mineralizaciones auríferas de El Vapor, se encuentra de manera muy frecuente en las secciones analizadas.

Dos patrones texturales diferentes y característicos de esfalerita se encuentran en El Vapor. En primera instancia, relacionado a una temporalidad temprana, se encuentran pequeñas inclusiones sólidas, redondeadas en la mayoría de los casos (2-40 μm), hospedadas dentro de cristales idiomórficos de pirita de grano grueso. En este caso, se interpreta que la esfalerita se depositó de manera coetánea con la segunda generación de pirita identificada, así como con

calcopirita, galena, pirrotina y oro, que coexisten también como inclusiones sólidas. Al igual que en el caso de la galena, ocasionalmente es posible observar cristales sub idiomórficos de esfalerita de color oscuro que se encuentran intercrecidos con cristales de pirita de grano grueso, lo que es indicativo de una cristalización coetánea en el mismo estadio de cristalización temprano.

El segundo patrón textural identificado en esfalerita corresponde a cristales sub idiomórficos de tamaño variable entre 200 y 500 μm , isotrópica bajo el microscopio, pero con frecuentes reflejos internos de color rojo. En este caso la esfalerita rellena fracturas abiertas entre cristales de pirita de grano grueso y cavidades vacías, adoptando su morfología, entre cristales de cuarzo masivo de grano grueso. En este caso la esfalerita presenta de manera muy frecuente pequeñas gotas de calcopirita que forman texturas de emulsión y exsolución, marcando un evento coetáneo de depósito (**Figura 20**).

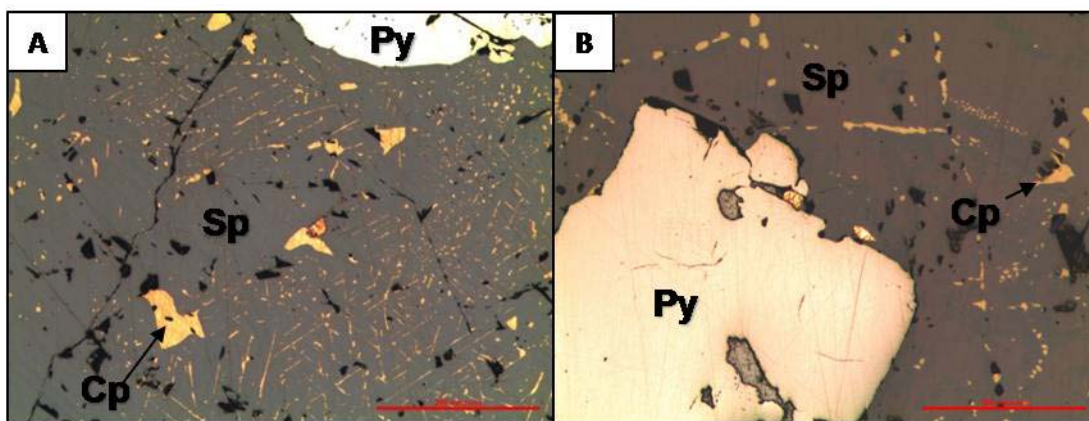


Figura 20. Microfotografías pequeñas gotas de calcopirita dentro de cristales de esfalerita, mostrando texturas de emulsión y exsolución. A) sección 1401, mina La Argentina, B) sección 1443, mina Las Margaritas. Abreviaturas según Kretz (1983).

Entre los cristales de esfalerita subidiomórficos, pertenecientes al segundo patrón textural identificado (primer y segundo evento paragenético), es posible reconocer la presencia de variaciones de color, entre una esfalerita muy pálida de color pardo y cristales de color mucho más oscuro, casi café. Estas variaciones de color se relacionan normalmente con diferencias en el contenido de hierro dentro de la estructura cristalográfica de este mineral y en depósitos epitermales ha sido

relacionado con un cambio en el estado de oxidación del azufre y por ende en el estado de sulfuración del fluido hidrotermal del cual se formó.

En algunas muestras analizadas de El Vapor, es posible observar como aparentemente con posterioridad a la formación de la esfalerita de color oscuro (más rica en hierro), se depositó una tercera generación de esfalerita de color más claro, que corta a cristales preexistentes (**Figura 21**), relacionada con cristales de cuarzo de textura comb.

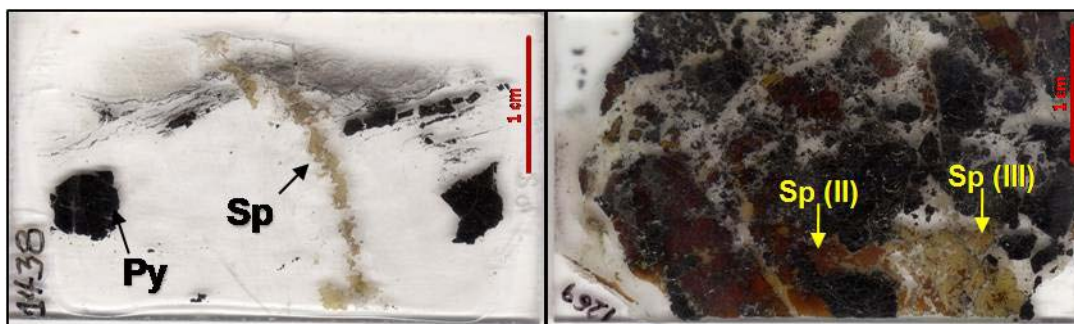


Figura 21. Segunda y tercera (?) generación de esfalerita, diferenciables por un color oscuro y claro, respectivamente. Se observa como la esfalerita mas clara, pobre en hierro, corta la mineralogía existente. Secciones 1438 y 1269, minas El Verrugoso y El Porvenir respectivamente. Abreviaturas según Kretz (1983).

Pirrotina:

La pirrotina es un mineral poco común en las mineralizaciones auríferas de El Vapor. Ocurre únicamente como inclusiones sólidas de pequeño tamaño (10-35 μm) hospedadas en cristales idiomórficos de pirita de grano grueso. Bajo el microscopio presentan un color rosáceo con anisotropía fuerte café-azul. El patrón textural exhibido por la pirrotina sugiere coetaneidad con el evento de generación de pirita gruesa, coexistiendo con inclusiones sólidas de calcopirita, esfalerita, galena y oro (**Figura 22**).

La pirrotina solamente fue encontrada en muestras de zonas mineralizadas hacia el oriente de la falla de El Nús, en donde la roca caja corresponde a shales negros de las Sedimentitas de Segovia, en un ambiente que se esperaría, fuera más reductor que hacia el occidente de la misma.

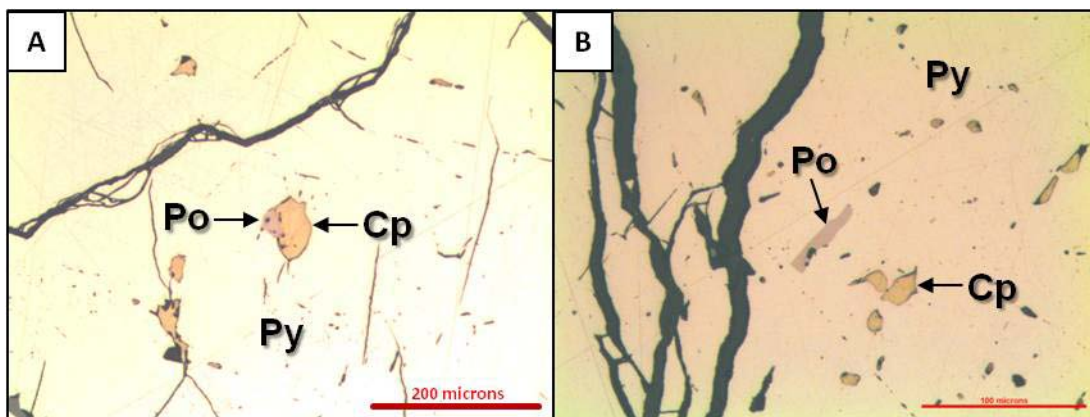


Figura 22. Inclusiones sólidas de pirrotina que coexisten con calcopirita, dentro de cristales de pirita de grano grueso, primer evento de mineralización identificado. A) Sección 1257 (A), mina La Fortuna y B) sección 1440, mina El Verrugoso. Abreviaturas según Kretz (1983).

Proustita-Pirargirita:

Este mineral es muy poco frecuente en las mineralizaciones de El Vapor, solamente fue encontrado en dos secciones delgadas pulidas analizadas (1401 y 1267). La proustita-pirargirita ocurre como cristales subidiomórficos que aparentemente reemplazan parcialmente a galena, así como relleno de fracturas abiertas, acompañante de galena, esfalerita e intercrecido con calcopirita (**Figura 23**). Su patrón textural la ubica como un mineral tardío en la secuencia de depósito de El Vapor.

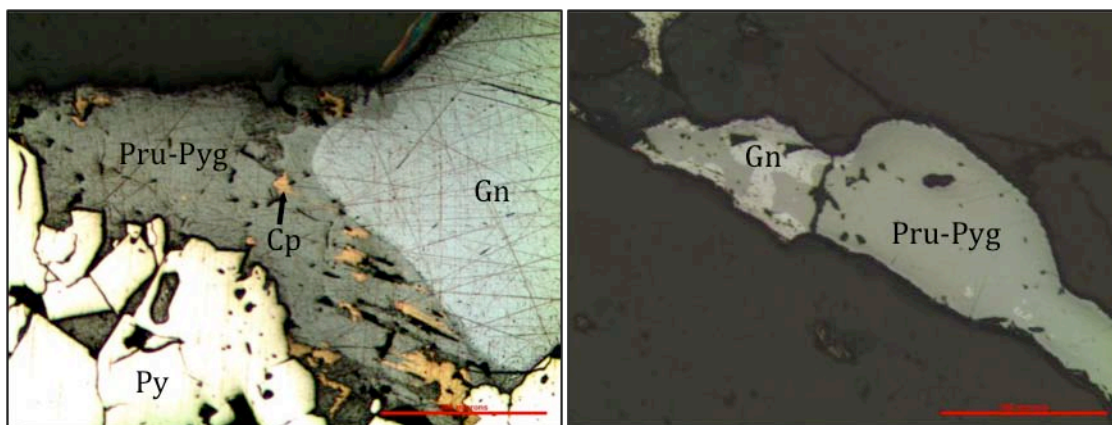


Figura 23. Cristales de proustita-pirargirita, mineral tardío en la secuencia de depósito en El Vapor y que coexiste con cristales de galena, calcopirita y esfalerita. Secciones 1401 y 1267 respectivamente. Abreviaturas según Kretz (1983).

Bornita:

En algunas de las muestras analizadas, se presentan cristales irregulares de tamaño muy pequeño (20-50 μm), color rosado, anisotrópicos, desarrollados hacia los bordes de cristales subidiomórficos de calcopirita, indicando una textura de reemplazamiento por procesos supérgenos (Figura 24).

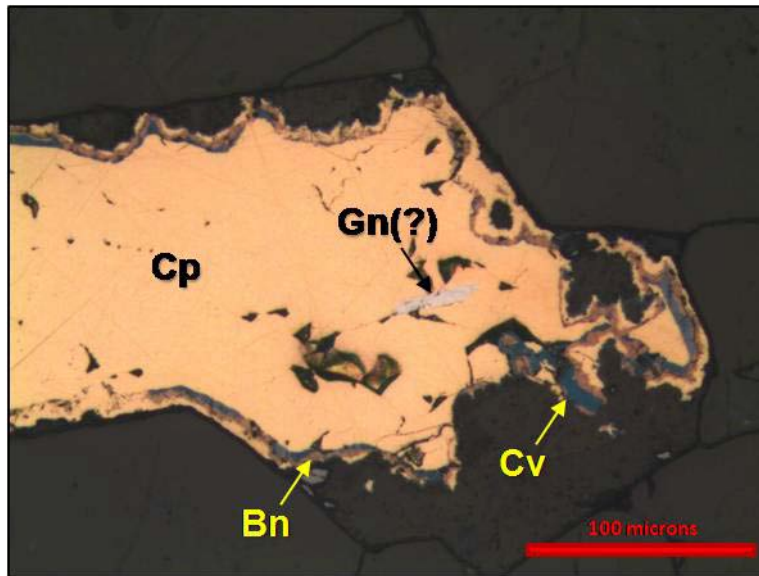


Figura 24. Bornita y covelina de alteración supérgénica desarrolladas en los bordes de un cristal de calcopirita. Sección 1252, mina Los Misteriosos.

Covelita:

Este mineral se encuentra siempre asociado con bornita, como cristales alargados irregulares pequeños (40-150 μm) de color azul intenso, fuertemente anisotrópico de tamaño pequeño, hacia los bordes de cristales de calcopirita, lo que indica una textura de reemplazamiento supérgeno.

9.3.2 MINERALOGÍA DE GANGA

La mineralogía de ganga en El Vapor está dominada por cuarzo y carbonato, en el primer caso fue posible discriminar tres tipos distintos de acuerdo con los criterios texturales establecidos por Dong *et al.* (1995), tipos que también son diferenciables por presentar tamaños y temporalidades distintas, por lo que fueron utilizados como guía para la elaboración de la secuencia paragenética de el depósito.

Cuarzo masivo:

Es el mineral dominante en las mineralizaciones de El Vapor, representando en promedio más del 80% del contenido modal de las muestras analizadas. Se presenta en agregados de cristales sub a euhedrales de bordes generalmente rectos, de tamaño variable entre 120 μm hasta incluso 5 mm, en la mayoría de los casos con extinción recta, ocasionalmente con extinción ondulosa (**Figura 25**) lo que indica deformación en estado sólido.

El cuarzo con textura masiva se encuentra siempre asociado con cristales de pirita de grano grueso, hacia la parte media y central de las zonas mineralizadas a ambos lados de la falla de El Nús. La textura masiva y su ubicación en vetillas, venas y vetas, se interpreta como el resultado de cristalización en espacios abiertos un estado de cristalización primaria.

Es importante anotar, que pese a las variaciones texturales existentes entre los sectores históricamente trabajados en las mineralizaciones de El Vapor, no existen diferencias en el carácter o abundancia relativa del cuarzo de textura masiva.

Cuarzo mosaico:

El cuarzo en mosaico se caracteriza por presentarse en forma de agregados con cristales individuales de pequeño tamaño, entre 10 y 70 μm , con bordes suturados y extinción ondulosa. Fue posible establecer dos temporalidades diferentes, con base en las asociaciones mineralógicas y patrones texturales.

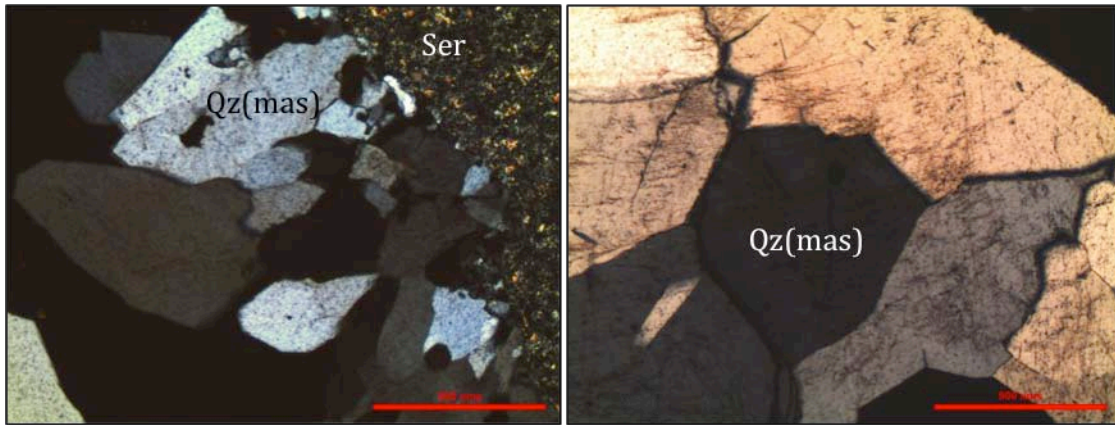


Figura 25. Microfotografías de agregados de cristales sub a euhedrales de cuarzo masivo, principal mineral en las mineralizaciones de El Vapor. Secciones 1421 y 1257(a) respectivamente. Abreviaturas según Kretz (1983).

En un primer estadio de generación, premineral en la secuencia paragenética, es posible observar cristales pequeños de cuarzo de textura en mosaico hacia los respaldos de zonas mineralizadas, a ambos lados del trazo de la falla de El Nús, acompañado de cristales de sericita/moscovita, que junto con pirita de grano fino conforman un ensamblaje mineralógico típico de alteración cuarzo-sericita o fílica. Se interpreta, que esta generación de cuarzo con textura mosaico es el resultado de la primera interacción de los fluidos hidrotermales con las rocas de caja.

En un segundo estadio de generación, es posible encontrar cristales de cuarzo mosaico desarrollados hacia los bordes de cristales de cuarzo de textura masiva, así como rellenando cavidades y fracturas abiertas entre cristales de pirita de grano grueso, acompañado de galena, calcopirita, esfalerita y oro. Esta segunda generación de cuarzo con textura mosaico presenta en algunos casos un tamaño de grano tan pequeño, que parece ser incluso criptocristalino (**Figura 26**). Este tipo de cuarzo ha sido interpretado como el resultado de recristalización a partir de calcedonia o sílice amorfa (Lovering, 1972 en Dong *et al.*, 1995).

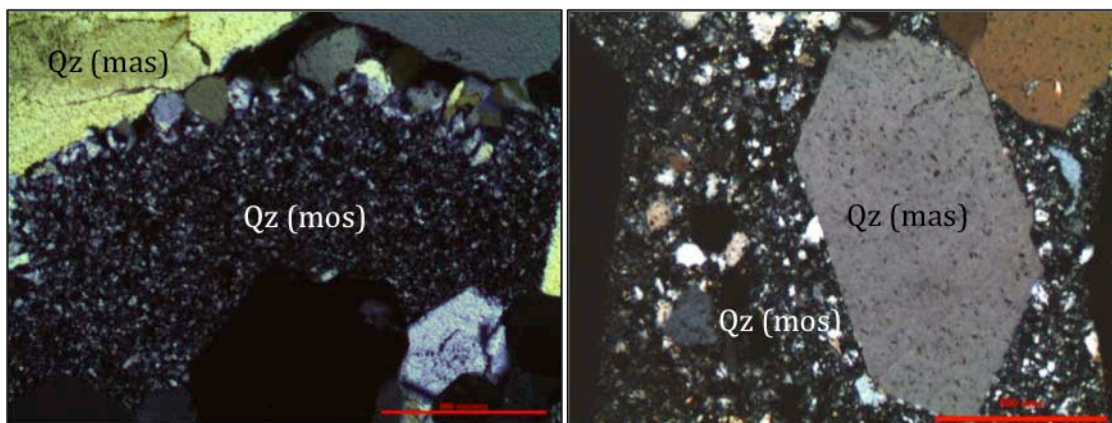


Figura 26. Microfotografías de agregados de cristales de grano fino, anhedrales y de bordes suturados de cuarzo en mosaico, que rellenan espacios entre cristales de cuarzo masivo. Secciones 1443 y 1445 respectivamente. Abreviaturas según Kretz (1983).

Cuarzo comb:

Este tipo de cuarzo fue encontrado relleno de vetillas que cortan la mineralogía de mena y como relleno de cavidades abiertas (drusas) hacia la parte central de las zonas mineralizadas, acompañado en algunas muestras de cristales de pirita y esfalerita de color claro. Corresponde a cristales sub a euhedrales normalmente de bordes rectos con extinción recta y con tamaño promedio de 200 μm , pero que alcanza incluso las 700 μm . En algunos casos excepcionales cristales de este tipo de cuarzo alcanzan los 5cm.

Los cristales de este tipo de cuarzo siempre crecen desde los bordes de las vetillas hacia el centro de las mismas y desde los bordes de los cristales de cuarzo masivo hacia el centro de cavidades en las muestras (**Figura 27**).

El cuarzo “comb” representa un evento distinto de hidrotermalismo en El Vapor, en un evento tardío, que se considera como una textura de crecimiento primario en espacios abiertos en la que los cristales que se imponen son aquellos cuya máxima tasa de crecimiento es perpendicular a las paredes de la superficie a partir de la cual crecen. Esta textura implica un período de poco cambio en las condiciones fisicoquímicas en un espacio abierto durante el tiempo de crecimiento de los cristales (Dong *et al.*, 1995).

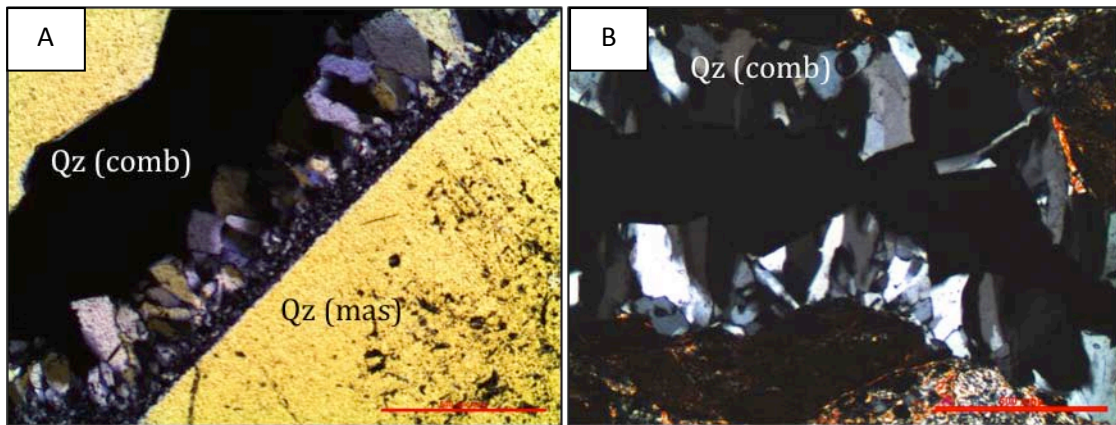


Figura 27. Microfotografías de cristales de cuarzo con textura “comb”, que rellenan parcialmente fracturas entre cristales de cuarzo masivo (A) y vetillas sinuosas que cortan toda la mineralogía precedente (B). Secciones 1443 y 1256 respectivamente.

Carbonatos (calcita):

Dos patrones texturales distintos pudieron ser observados en las mineralizaciones de El Vapor, con temporalidades diferentes. En un primer estadio, se encuentran cristales anhedrales de grano fino (20-30 μm) diseminados hacia los respaldos de las zonas mineralizadas asociados con clorita y epidota, particularmente hacia el occidente del trazo de la falla de El Nús, en rocas del Batolito de Segovia. Este primer estadio se interpreta como el resultado de alteración hidrotermal como respuesta a la interacción de las rocas caja con los fluidos hidrotermales.

En un segundo evento de depósito, la calcita se presenta como cristales euhedrales a subhedrales de relieve basculante, con dos direcciones de exfoliación bien marcadas en ángulos de 60 y 120°, cuyo tamaño promedio es de 300 μm . Estos cristales se presentan de forma tardía en la secuencia de depósito de El Vapor, pues se encuentran rellenoando fracturas y cavidades entre cristales del cuarzo masivo y sulfuros (**Figura 28**).

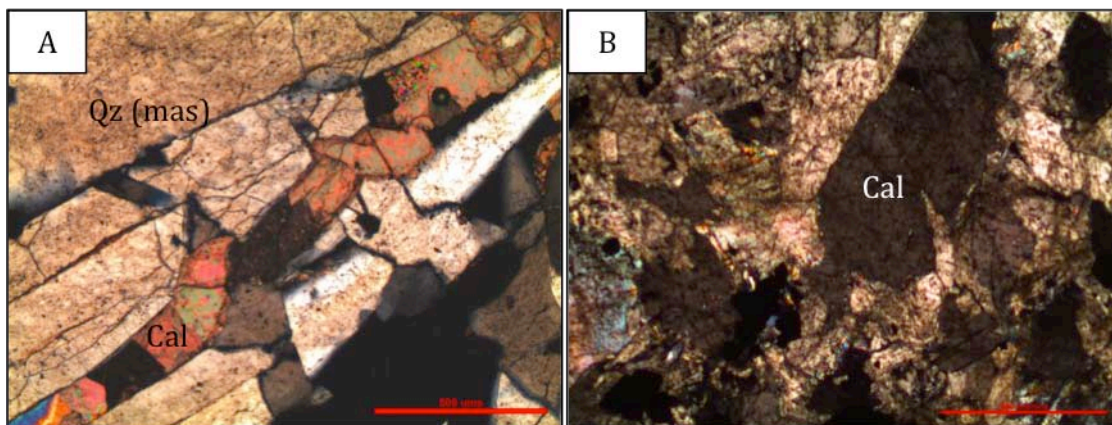


Figura 28. A) Vetilla de carbonato (calcita) que atraviesa cristales de cuarzo masivo. Sección 1267. B) Cristales subhedrales de calcita que rellenan espacios. Sección 1269. Abreviaturas según Kretz (1983).

9.4 SECUENCIA PARAGENÉTICA

Con base en observaciones petrográficas de relaciones de corte, patrones texturales, cambios de tamaño, aparición y desaparición de minerales, tanto en luz reflejada como transmitida, fue posible realizar una secuencia paragenética a nivel de depósito en la cual se refleja la temporalidad de todos los minerales reconocidos en El Vapor (**Figura 33**).

Tres eventos de depósito distintos fueron identificados en El Vapor, ligeramente diferentes al occidente y oriente de la falla de El Nús, lo que se interpreta como resultado de las diferencias existentes entre los distintos tipos de rocas caja:

- En El Vapor se reconoce en primera instancia, un evento premineral marcado por la presencia hacia los respaldos de las zonas mineralizadas, de halos de alteración que no superan los 50 cm de espesor, especialmente desarrollados hacia el oriente de la falla de El Nús. Estos halos están compuestos de una primera generación de pirita de grano fino, asociada con sericita y cuarzo de textura mosaico (**Figura 29**), así como carbonato de grano fino, clorita y epidota a partir de cristales de anfíbol en el Batolito de Segovia. Este evento se interpreta como el resultado de la primera

reacción de las rocas caja con fluidos hidrotermales de pH cercano a la neutralidad.

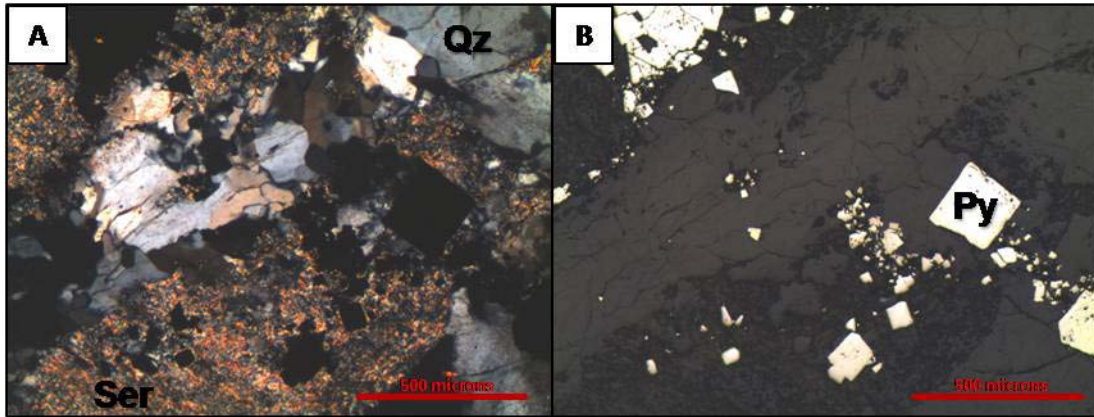


Figura 29. Microfotografías representativas del evento mineralizante, hacia El respaldo de veta de cuarzo. En las fotografías se observa la asociación pirita (grano fino) + cuarzo mosaico + sericita (illita + moscovita), sección 1430, mina Cien Puertas. Abreviaturas según Kretz (1983).

- Con posterioridad al evento de alteración hidrotermal identificado, se produjo de manera sin-cinemática (como lo sugieren la discontinuidad y disposición anastomosada de las vetillas, venas y vetas) hacia el oriente del trazo de la falla de El Nús, en las Sedimentitas de Segovia, la cristalización en espacios abiertos de agregados cristalinos de cuarzo de textura masiva acompañados de cristales subidiomórficos de pirita de grano grueso con inclusiones sólidas redondeadas de pequeño tamaño de galena, esfalerita, calcopirita y pirrotina, así como inclusiones pequeñas de granos de oro electrum dentro de la pirita (**Figura 30**). Ocasionalmente en este evento de mineralización se reconoció la existencia de cristales subidiomórficos de esfalerita intercrecidos con pirita de grano grueso. La presencia de pirrotina dentro de este evento de mineralización (en mineralizaciones al oriente de la falla de El Nús) es indicativa de un fluido hidrotermal con un estado de oxidación de azufre reducido. Hacia el occidente de la falla de El Nús, en rocas del Batolito de Segovia, este evento mineralizante presenta la misma mineralogía identificada, sin embargo, las texturas zonadas de las vetas

sugieren la cristalización en espacios abiertos sometidos a una menor deformación. En algunos sectores, en cercanías al trazo de la falla de El Nús y estructuras menores, el primer evento de mineralización se caracteriza por la generación de vetillas y venas centimétricas en stockwork y brechas hidrotermales matriz soportadas, que embeben fragmentos de las rocas caja.

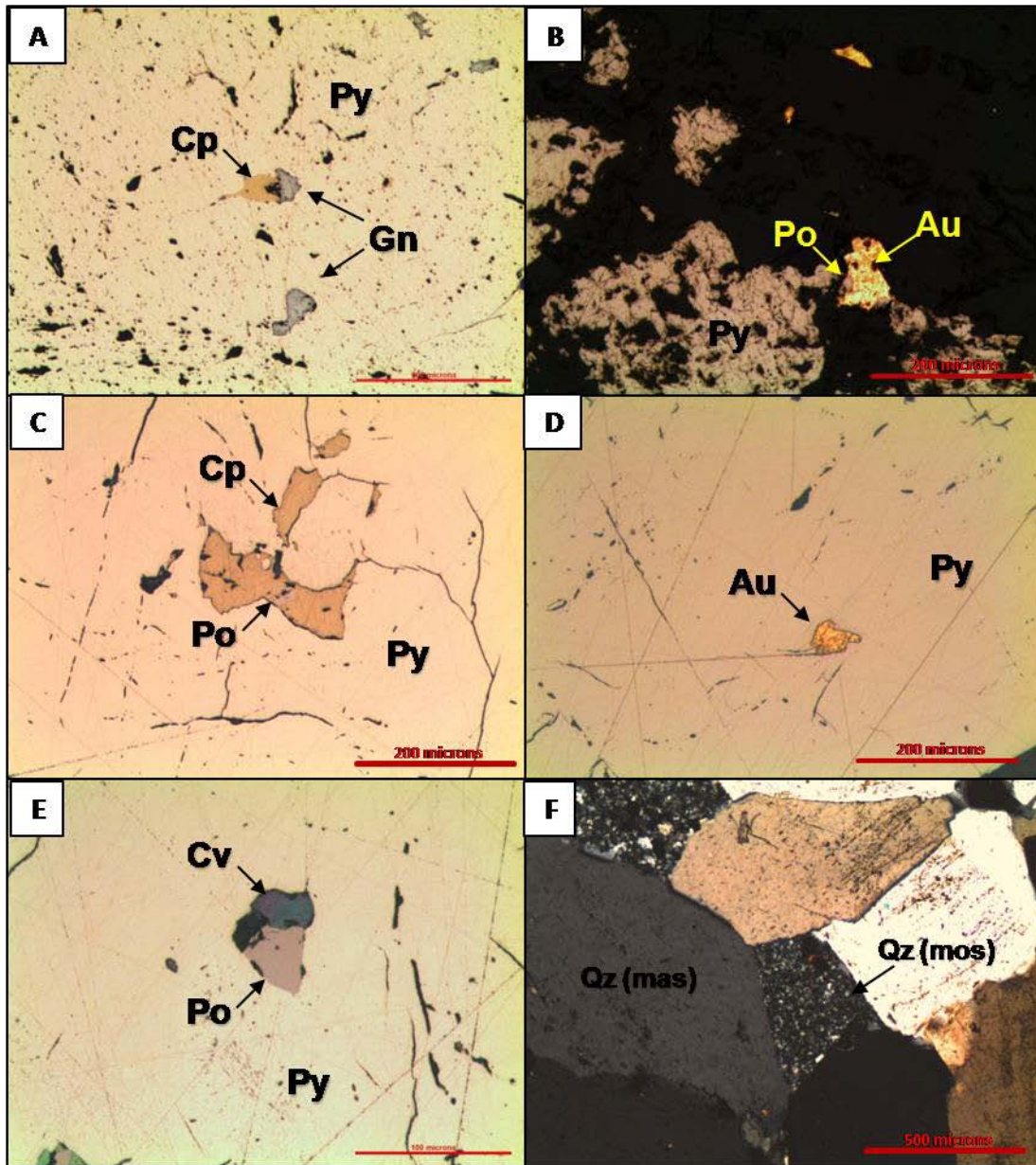


Figura 30. Microfotografías asociaciones minerales primer evento de mineralización. A) sección 1251, mina El Bus, B), C) y D) sección 1257(A), mina La Fortuna, E) sección 1448, mina El Bus, F) sección 1445, mina Las Margaritas. Abreviaturas según Kretz (1983).

- Un periodo de cizallamiento y fracturamiento intenso en un régimen frágil, probablemente relacionado con el movimiento de la falla de El Nús, fue el responsable de la recristalización en estado sólido de cristales de cuarzo masivo y generación de cuarzo de textura mosaico, así como de fracturas abiertas en los cristales de pirita de grano grueso del primer evento de mineralización, por lo cuales circularon fluidos hidrotermales depositando cristales subidimórficos de galena, calcopirita, esfalerita y oro electrum, que además rellenan cavidades y espacios abiertos, adoptando su forma (**Figura 31**). La deformación de este evento de mineralización se evidencia en la deflexión de huellas de exfoliación (“pits” triangulares) en cristales de galena.

El segundo evento de mineralización implica un cambio en el tamaño de los minerales depositados, así como un cambio mineralógico marcado por la desaparición de pirrotina y aparición, hacia el final del mismo, de Proustita-Pirargirita, sulfosales de Ag, As y Sb (elementos volátiles), indicativos de un incremento del estado de oxidación del azufre del fluido hidrotermal, desde uno reducido a uno un poco más oxidado.

Hacia el occidente de la falla de El Nús, la deformación observada en el segundo evento de mineralización es menor, pues aunque los minerales del primer evento se encuentran fracturados, se evidencia una zonación mineralógica “tranquila” hacia la parte central de las zonas mineralizadas.

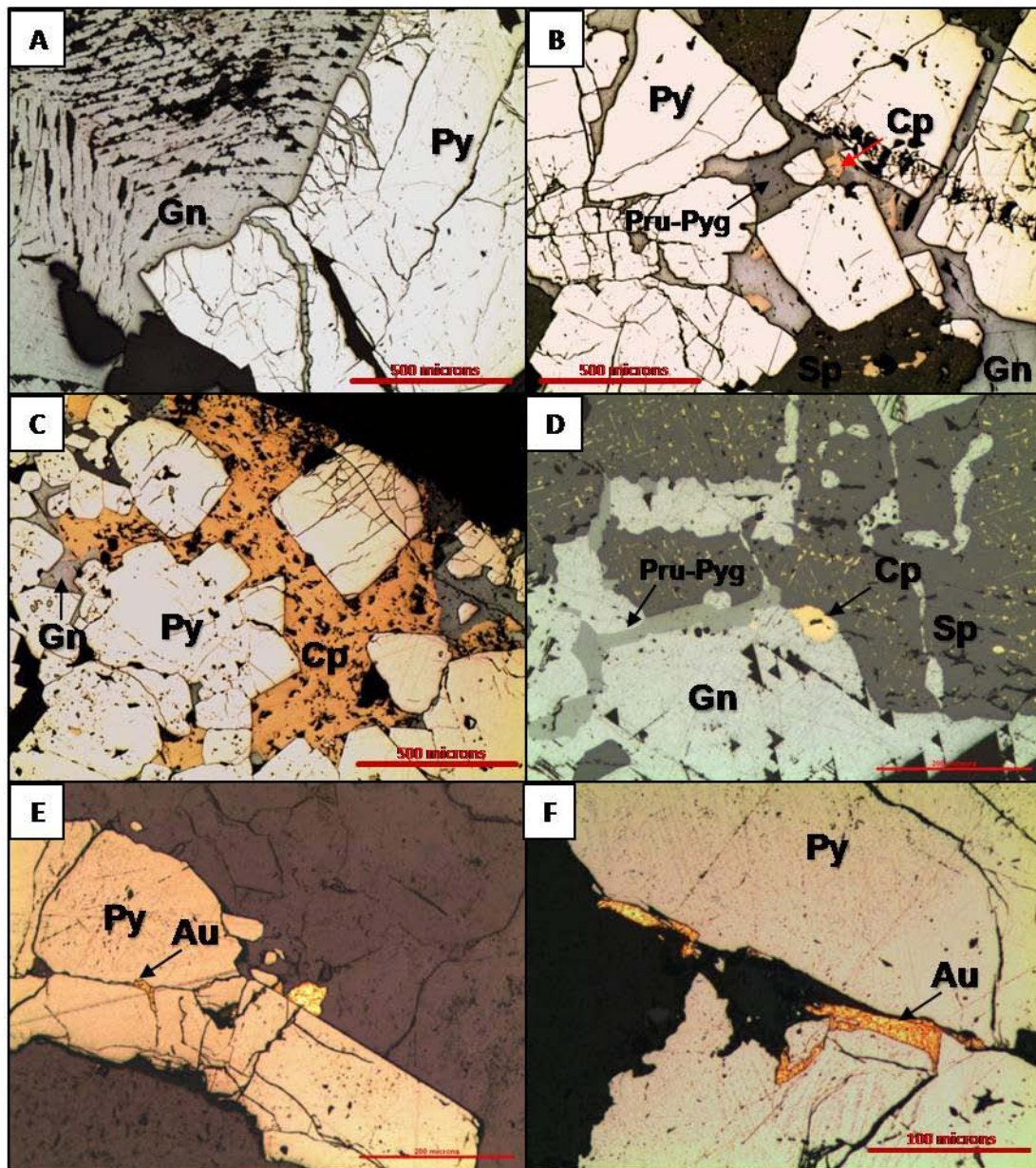


Figura 31. Microfotografías representativas del segundo evento de mineralización identificado. Sección 1267, mina La Menez, B), C) y D), sección 1401, mina La Argentina, E) sección 1449, mina El Bus, F) sección 1257(B), mina La Fortuna. Abreviaturas según Kretz (1983).

- Un tercer evento de mineralización reconocido en El Vapor, está constituido por la cristalización en espacios abiertos hacia la parte central de las zonas mineralizadas, de cristales hialinos de cuarzo con textura en peine que pueden alcanzar incluso los 5 cm y que se reconocen en sección delgada por el relleno de vetillas sinuosas que cortan la mineralogía existente y que

están acompañadas por cristales de pirita y esfalerita de color claro (**Figura 32**). La asociación mineralógica y las texturas de relleno de espacios abiertos, con cristalización de cuarzo desde las paredes de las cavidades hacia el centro, son indicativas de un estadio de mineralización desarrollado en condiciones fisicoquímicas mucho más “tranquilas” que las de los dos primeros estadios. Así mismo, la presencia de esfalerita de color claro, sugiere que los fluidos hidrotermales responsables de este evento, fueron más oxidados.

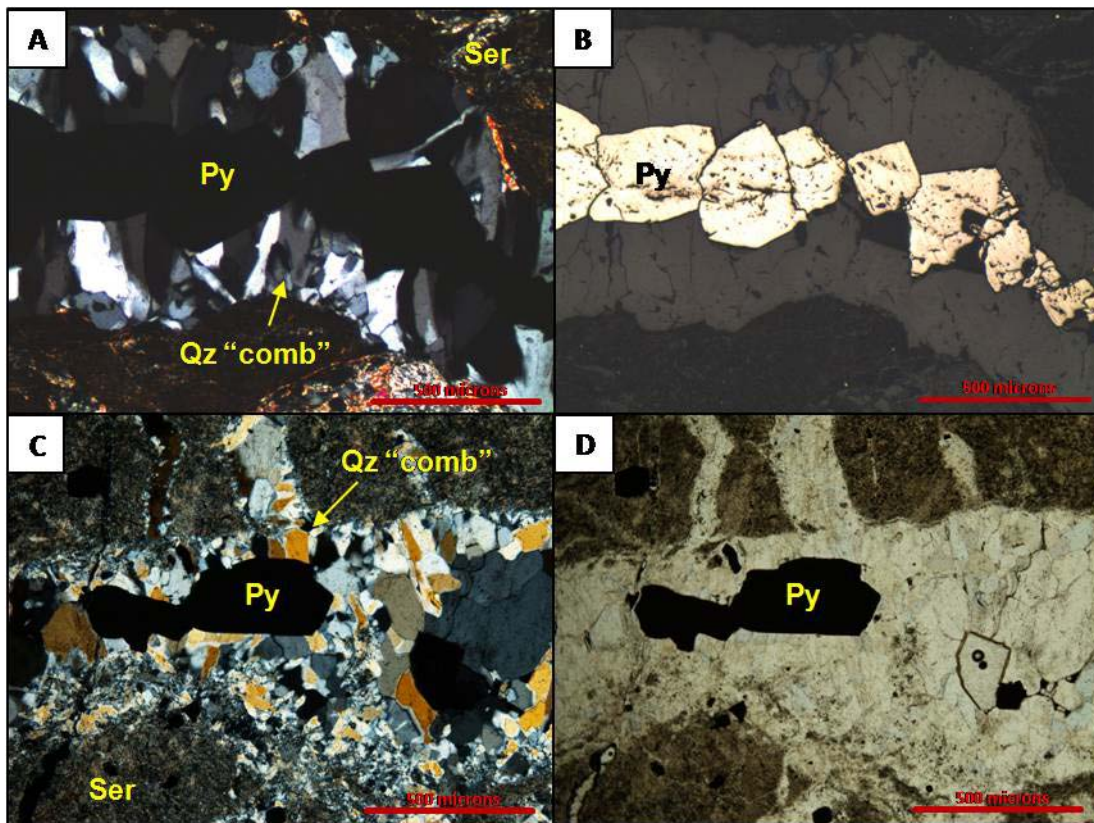


Figura 32. Microfotografías representativas del tercer evento de mineralización, en el que cristales de cuarzo con textura en peine rellenan vetillas acompañados por pirita. A) y B) sección 1256, mina La Fortuna, C) y D) sección 1421, mina La Menez. Abreviaturas según Kretz (1983).

- Finalmente, hacia los bordes de los cristales de calcopirita, es posible observar la presencia de covelina y bornita mostrando texturas de reemplazamiento supérgeno parcia (**Figura 24**). Este evento se interpreta como el resultado de alteración supergénica postmineral, como

consecuencia la infiltración de fluidos meteóricos en las zonas mineralizadas.

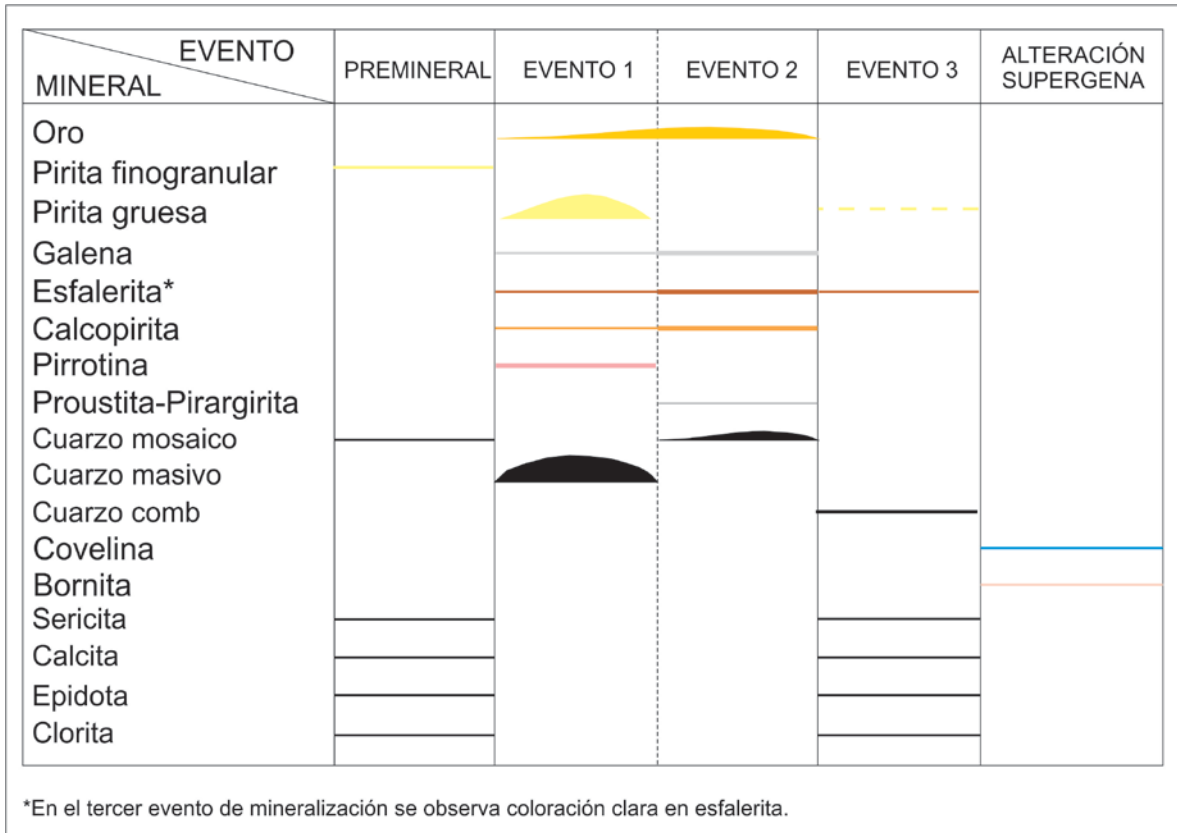


Figura 33. Secuencia paragenética para las mineralizaciones de El Vapor. Los eventos uno y dos se encuentran separados por un evento fuerte de fracturamiento.

9.5 MICROQUÍMICA DE MINERALES DE MENA

En algunas de las secciones pulidas analizadas, escogidas con el objetivo de que los cristales, principalmente de oro, así como de esfalerita, galena, calcopirita y pirita, fueran representativos de la mineralogía dominante en la zona de El Vapor, se efectuaron análisis de microsonda electrónica con el fin de determinar su composición química precisa y establecer variaciones probables dentro de los mismos.

9.5.1 ANÁLISIS ELEMENTAL DE ORO

Se llevaron a cabo cuarenta y siete (47) análisis puntuales de granos de oro (**Tabla 1**) que muestran una variación entre 43.29 y 84.93 Wt% de oro, y entre 17.33 y 51.59 Wt% de plata con un promedio de 74.79 y 24.11Wt% respectivamente, que corresponde en la mayoría de los casos a oro tipo electrum. Contenidos menores de Pb (0.01 - 0.13Wt%), Zn (0.01–0.76Wt%), Bi (0.04 – 0.29Wt%), Cd (0.01 – 0.1Wt%) y Cu (0.01 – 3.24Wt %) con valores despreciables de Mo, Mn, Sb y As (0.01 - 0.05 Wt%). En algunos de los granos de oro se encuentran contenidos de Fe entre 0.01 y 1.31 Wt% y de S entre 0.03 y 2.12 Wt%, lo que puede indicar la presencia de pirita a la cual está acompañando este mineral dentro de la secuencia de depósito.

Los datos obtenidos muestran dos tendencias en la distribución de oro (**Figura 34**), en ella, los valores más bajos están entre 43 y 68 Wt% y corresponden a granos que se encuentran como acompañantes de cristales de pirita gruesa y esfalerita de muestras cuya roca caja corresponde al Batolito de Segovia (1401 y 1443), hacia el occidente de la falla El Nús en la mina La Argentina (**Figura 3**), en estas mismas muestras además, los valores de Pb y Zn encontrados en los cristales de oro, son los más altos de toda la serie.

9.5.2 ANÁLISIS DE PIRITA

Un total de treinta (30) análisis puntuales en cristales de pirita (**Tabla 2**), tanto fina como de grano grueso fueron efectuados, mostrando valores de hierro que varían entre 46.04 y 46.80 Wt% con contenidos de azufre entre 50.5 y 53.73Wt%. Los valores de arsénico en las muestras analizadas son bajos, entre 0.01 y 1.22Wt%, que es concordante con las observaciones petrográficas que muestran un comportamiento isotrópico de la pirita en la gran mayoría de las muestras analizadas.

Contenidos menores de plomo (0.01-0.31Wt%) y cinc (0.01-0.46Wt%), probablemente reflejen intercrecimientos de esfalerita y galena con la pirita. Valores muy bajos de plata y oro, fueron encontrados.

Pese a que fueron analizados cristales de pirita de distintas generaciones (fina y gruesa), no se presenta una variación química significativa entre ellos.

Tabla 1. Composición en Wt% de 47 puntos de análisis en cristales de oro de El Vapor.														
Muestra	Fe	As	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd	Bi	Mo	Sb	S	Ag	Au	Total
1401	0,27	----	----	0,01	----	0,12	0,03	0,04	----	----	0,21	51,59	43,29	95,56
1401	0,09	----	0,01	----	----	0,13	0,03	0,1	----	----	0,08	49,65	44,54	94,63
1429	0,06	----	----	0,01	----	----	0,04	0,25	0,05	----	0,12	23,09	78,28	101,89
1429	0,03	----	----	----	----	----	0,02	0,24	----	----	0,09	23,07	77,56	101,02
1429	0,03	----	----	----	----	----	0,03	0,28	0,07	----	0,06	23,54	76,89	100,89
1443	0,01	----	----	----	0,03	----	0,05	0,18	0,03	----	0,06	29,99	67,89	98,25
1443	----	----	----	----	0,01	----	0,03	0,17	0,01	----	0,03	30,85	68,05	99,13
1443	0,01	----	----	----	0,02	----	0,01	0,13	----	0,05	0,06	30,49	67,8	98,58
1443	0,03	----	----	----	0,09	0,01	0,07	0,18	----	----	0,08	30,32	67,9	98,69
1443	0,02	----	----	----	0,12	0,01	0,1	0,13	----	----	0,05	31,07	66,93	98,43
1443	0,09	----	----	0,03	0,76	----	0,06	0,14	----	----	0,2	31,37	66,87	99,5
1449	0,01	----	----	0,01	----	----	0,05	0,14	0,01	----	0,07	18,81	76,65	95,75
1449	----	----	----	0,01	----	----	0,03	0,15	0,02	----	0,05	19,39	79,09	98,74
1449	0,37	----	----	----	----	----	0,04	0,21	----	----	0,17	21,65	77,84	100,28
1449	0,1	----	----	0,02	----	----	0,05	0,23	----	0,02	0,16	23,8	74,02	98,41
1449	0,14	----	----	0,03	----	0,07	0,01	0,08	----	----	0,23	23,56	76,55	100,67
1449	0,26	----	----	----	----	----	----	0,27	----	----	0,17	21,35	79,49	101,55
1449	0,01	----	----	----	----	----	----	0,2	0,01	----	0,07	21,53	77,47	99,29
1449	0,01	----	----	----	----	----	0,05	0,18	0,02	----	0,1	18,85	80,13	99,35
1449	0,08	----	----	0,03	----	----	0,06	0,29	0,01	0,03	0,23	19,86	79,08	99,67
1449	0,19	0,02	----	0,14	----	----	0,02	0,13	----	----	0,4	22,17	76,99	100,06
1449	0,05	----	----	0,06	----	----	0,06	0,2	----	0,03	0,27	20,7	78,95	100,32
1449	0,05	----	----	0,01	----	0,01	0,05	0,29	----	----	0,09	21,78	80,02	102,29
1449	0,11	----	----	0,01	----	----	0,02	0,26	----	----	0,14	22,48	76,79	99,81
1449	0,04	----	----	0,02	----	----	----	0,27	----	0,05	0,24	20,06	76,03	96,72
1449	0,11	----	----	0,03	----	0,01	----	0,2	----	----	0,24	22,15	75,23	97,98
1449	0,2	0,01	----	0,76	----	----	0,03	0,26	----	----	0,67	20,08	76,29	98,3

Tabla 1. Continuación.

<i>Muestra</i>	<i>Fe</i>	<i>As</i>	<i>Mn</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Pb</i>	<i>Cd</i>	<i>Bi</i>	<i>Mo</i>	<i>Sb</i>	<i>S</i>	<i>Ag</i>	<i>Au</i>	<i>Total</i>
1449	0,14	----	----	0,03	----	0,07	0,01	0,08	----	----	0,23	23,56	76,55	100,67
1449	0,29	----	----	0,72	----	0,01	----	0,21	0,02	----	0,72	20,62	76,08	98,66
1449	0,01	----	----	----	----	----	----	0,18	----	----	0,08	18,09	84,93	103,3
1449	0,01	----	----	----	----	----	----	0,29	----	----	0,06	17,33	82,09	99,78
1449	0,01	----	----	----	----	----	0,02	0,1	----	0,01	0,07	18,95	79,47	98,63
1449	0,29	----	0,02	3,24	----	----	0,01	0,16	0,01	----	2,12	22,61	72,19	100,65
1449	1,31	----	----	2,59	----	----	0,03	0,13	----	----	1,7	22,76	71,72	100,24
1449	0,88	----	----	----	----	----	0,04	0,18	----	----	0,72	22,06	75,95	99,83
1449	0,13	----	0,01	0,03	----	0,1	----	0,09	0,03	----	0,37	23,23	76,94	100,94
1449	0,01	----	----	----	----	----	0,04	0,22	----	----	0,05	21,29	79,06	100,67
1449	----	----	----	----	----	----	0,07	0,23	----	----	0,12	22,03	78,59	101,05
1449	0,03	----	----	----	----	0,03	----	0,23	----	----	0,12	19,8	80,84	101,04
1449	0,04	----	----	----	----	0,07	0,02	0,21	----	----	0,12	20,22	81,73	102,42
1449	----	----	----	----	----	----	0,01	0,22	----	0,02	0,07	18,64	78,99	97,95
1267	----	----	----	----	----	0,02	----	0,24	----	0,01	0,06	24,92	74,44	99,69
1267	----	----	----	----	----	0,07	0,05	0,17	0,01	----	0,1	24,84	75,21	100,47
1267	0,01	----	----	----	----	0,03	----	0,17	----	----	0,09	27,27	72,53	100,09
1267	----	----	----	----	----	----	0,06	0,24	0,01	----	0,14	25,05	74,51	100,01
1267	0,01	----	----	----	----	0,05	0,03	0,28	0,03	----	0,07	24,85	75,25	100,57
1267	----	----	----	----	----	----	0,08	0,21	----	0,03	0,04	22,82	78,15	101,33
1267	----	----	----	----	----	0,01	----	0,24	----	----	0,04	22,4	79,93	102,63

9.5.3 GALENA

Veinticuatro (24) puntos de análisis en cristales de distintas generaciones de galena fueron analizados (**Tabla 3**), mostrando contenidos de plomo entre 50.12 y 57.3Wt%, con valores de azufre entre 44.75 y 52.55Wt%. Los análisis efectuados permitieron determinar que la galena en El Vapor no contiene valores significativos de plata (0.01 – 0.22Wt%), que concuerdan con su comportamiento isotrópico bajo el microscopio.

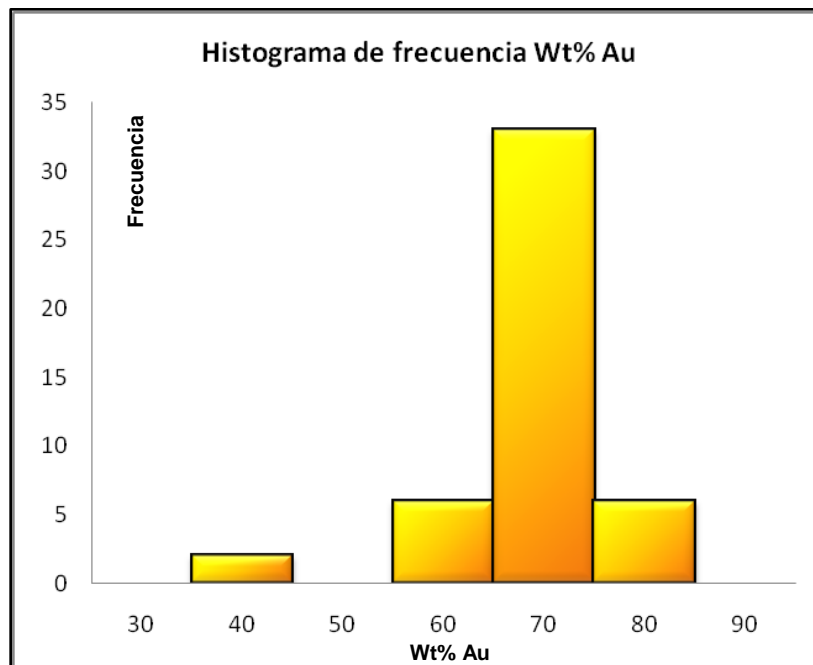


Figura 34. Histograma de frecuencia del porcentaje en peso del contenido de oro en los cristales analizados.

Tabla 2. Composición en Wt% de 30 puntos de análisis en cristales de pirita de El Vapor.

Muestra	Fe	As	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd	Mo	Sb	S	Ag	Au	Total
1401	45,04	----	----	----	0,3	0,21	0,06	----	0,01	51,74	0,02	----	97,39
1401	45,37	----	----	0,02	0,32	0,21	0,03	----	----	52,56	0,03	----	98,54
1401	46,34	----	----	----	0	0,09	0,01	----	----	53,21	----	----	99,65
1401	46,34	0,03	----	----	----	0,21	----	----	0,04	53,3	0,01	----	99,91
1443	44,79	0,53	0,02	----	0,1	0,14	0,01	----	0,02	51,77	0,03	0,06	97,46
1443	43,04	0,33	----	0,01	0,09	0,18	----	----	----	50,55	----	0,5	94,7
1449	46,38	1,22	----	----	0,01	0,08	----	0,01	----	52,78	----	----	100,47
1449	46,22	0,39	0,01	0,01	----	0,06	----	----	----	52,81	0,02	----	99,52
1449	45,99	1,14	0,01	----	0,04	0,2	----	0,03	----	52,66	0,06	----	100,13
1449	45,87	0,17	----	----	----	0,29	----	0,03	----	53,27	0,08	----	99,71
1252	46,23	0,17	0,01	----	----	0,01	----	----	----	53,32	----	----	99,74
1252	45,91	0,04	0	0,02	0,03	0,22	----	0,03	----	52,65	0,01	----	98,9

Tabla 2. Continuación.

Muestra	Fe	As	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd	Mo	Sb	S	Ag	Au	Total
1252	46,8	0,37	0,03	0,07	0,02	0,19	0,03	0,05	0,02	53,27	----	----	100,84
1252	45,96	0,33	----	----	0,02	0,31	----	----	0,03	52,64	----	0,02	99,32
1252	46,21	0,13	----	0,05	----	0,12	----	----	----	53,31	----	0,01	99,84
1252	46	----	----	0,01	0,02	0,27	----	0,01	----	53,38	----	0,02	99,72
1252	45,89	----	----	0,04	0,01	0,15	----	----	----	53,69	0,03	----	99,81
1267	45,83	----	0,01	0,01	0,07	0,21	----	----	----	53,26	----	0,01	99,4
1267	45,81	----	----	----	0,04	0,23	----	0,04	----	53,26	0,01	0,01	99,39
1267	46,09	----	----	----	0,01	0,18	----	----	----	53,46	0,04	0,01	99,8
1267	46,43	----	0,01	----	0,01	0,08	----	----	----	53,34	0,06	----	99,93
1267	46,36	----	0,02	0,05	----	0,11	----	----	----	53,73	0,08	0,02	100,36
1267	46,5	0,16	----	----	----	0,11	----	0,01	----	53,54	0,02	----	100,34
1267	46,5	0,01	----	0,02	0,01	0,16	----	----	----	53,45	----	0,03	100,19
1267	46,55	0,01	----	0,02	0,01	0,05	----	----	----	53,55	0,03	----	100,22
1267	46,63	----	0,01	0,02	----	0,15	----	----	----	53,64	----	----	100,45
1267	46,16	0,72	0,01	----	----	0,13	----	0,01	----	53,1	0,04	0,04	100,21
1267	45,96	0,01	----	0,01	0,46	0,16	----	----	----	53,62	0,02	0,08	100,31
1267	46,22	0,84	----	0,01	----	0,11	----	----	----	53,41	----	0,03	100,63
1267	46,26	0,51	----	0,01	----	0,16	----	0,02	----	53,1	----	0,01	100,06

9.5.4 ESFALERITA

Solamente se obtuvieron cuatro (4) análisis puntuales de esfalerita de color caramelo claro, que se correlaciona con los valores relativamente bajos de hierro obtenidos (0.53 – 5.38Wt%), con contenidos de cinc entre 61.09 y 66.43Wt% y entre 33.47 y 33.79Wt% de azufre. El manganeso y el cadmio varían entre 0.07-0.12Wt% y 1.1-1.65Wt% respectivamente, este último en proporciones altas.

Tabla 3. Composición en Wt% de 24 puntos de análisis en cristales de galena de El Vapor.

Muestra	Fe	As	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd	Mo	Sb	S	Ag	Au	Total
1401	----	----	----	0,01	0,02	86,51	0,08	----	0,07	13,34	0,02	----	100,04
1401	----	----	0,02	----	----	86,15	0,01	----	0,04	13,34	0,02	----	99,58
1401	----	----	----	0,01	0,01	86,42	0,03	----	----	13,47	----	----	99,96
1401	----	----	0,01	----	----	86,4	0,07	----	0,05	13,57	0,02	----	100,12
1401	0,03	----	----	----	----	86,1	0,07	----	0,04	13,49	0,03	----	99,77

Tabla 3. Continuación.													
<i>Muestra</i>	<i>Fe</i>	<i>As</i>	<i>Mn</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Pb</i>	<i>Cd</i>	<i>Mo</i>	<i>Sb</i>	<i>S</i>	<i>Ag</i>	<i>Au</i>	<i>Total</i>
1401	----	----	----	0,02	----	85,86	0,04	----	0,08	13,69	0,06	----	99,75
1401	0,04	----	----	0,03	0,06	85,16	----	----	----	13,3	0,01	----	98,59
1401	0,02	----	0,04	----	----	84,91	0,04	----	----	13,35	0,02	----	98,37
1438	----	----	----	----	----	85,28	0,02	----	----	13,3	0,03	----	98,64
1438	----	----	0,05	0,05	0,19	85,23	0,03	----	----	13,38	0,01	----	98,94
1438	----	----	0,04	----	0,02	85,54	0,12	----	0,07	13,39	0,03	0,04	99,25
1438	0,03	----	0,03	0,03	0,31	85,06	0,02	----	0,03	13,2	----	----	98,72
1443	----	----	0,01	----	0,07	84,42	0,06	----	0,17	13,31	0,19	----	98,22
1443	0,01	----	----	0,01	0,45	84,31	0,04	----	0,17	13,17	0,16	----	98,31
1443	0,03	----	0,02	----	----	84,95	0,03	----	0,12	13,38	0,14	0,11	98,76
1443	0,01	----	0,02	----	0,37	83,8	0,03	----	0,19	12,74	0,14	----	97,3
1443	0,04	----	----	0,02	0,18	83,77	0,02	----	0,08	12,96	0,09	0,33	97,49
1443	0,21	----	0,01	----	2,03	83,67	0,07	----	0,11	13,26	0,15	----	99,52
1267	----	----	----	----	0,09	86,4	----	0,07	----	13,54	0,05	0,01	100,15
1267	----	----	0,03	----	----	86,35	----	0,08	----	13,35	0,05	0,02	99,88
1267	0,01	----	----	0,01	0,01	86,29	----	0,11	----	13,38	0,11	0,06	99,98
1267	----	----	----	0,01	----	86,58	----	0,05	----	13,54	0,07	0,02	100,28
1267	0,46	----	----	----	----	86,63	----	0,04	----	10,54	0,03	----	97,7
1267	0,38	----	0,02	0,01	----	86,46	----	0,09	----	10,48	0,07	0,05	97,56

9.5.5 CALCOPIRITA

Tres (3) puntos de análisis se obtuvieron en un cristal de calcopirita con contenidos de cobre entre 34.17 y 34.35Wt%, 30.17 a 30.36Wt% de hierro y entre 35.59 y 35.74 Wt% de azufre.

9.6 ALTERACIONES HIDROTERMALES

En El Vapor, tanto a nivel de afloramiento como microscópico es posible identificar dos tipos de alteraciones hidrotermales diferentes, cuya extensión en la mayoría de los casos está limitada a unos pocos centímetros o decímetros en los respaldos de las zonas mineralizadas, lo que es indicio de una circulación de fluidos

canalizada y unas condiciones fisicoquímicas en relativo equilibrio con las rocas de caja.

El tipo de alteración hidrotermal encontrado varía en las unidades que sirven de roca caja a las mineralizaciones de El Vapor, lo que puede deberse a la reactividad de las mismas ante su interacción con los fluidos mineralizantes.

9.6.1 CARBONATACIÓN - ALTERACIÓN PROPILÍTICA

La alteración propilítica, en ocasiones carbonatación, se presenta especialmente en zonas donde la roca de caja de las mineralizaciones de El Vapor corresponde a dioritas y cuarzo dioritas del Batolito de Segovia, tanto en el sector sur (minas La Menez y Cien Puertas), como hacia el occidente de la falla de El Nús (minas La Argentina, El Muerto, Las Margaritas). Esta alteración hidrotermal se presenta generalmente de manera restringida hacia los respaldos de las zonas mineralizadas, sin embargo en algunos lugares, alejados de zonas mineralizadas o con presencia de labores mineras, fue posible reconocer en muestra de mano la presencia de clorita y carbonato (calcita) de manera pervasiva y de intensidad moderada. Lo anterior indica que probablemente sobre esta unidad circularon fluidos hidrotermales de forma mucho más amplia que en las Sedimentitas de Segovia.

Los minerales de alteración encontrados incluyen la asociación mineralógica clorita + epidota + carbonato, que se desarrollan de forma pervasiva y selectiva sobre fenocristales de anfíbol y plagioclasa preexistentes.

En las secciones delgadas pulidas analizadas, la clorita se presenta en un 3.5% areal en promedio, como cristales de color verde oscuro, fuerte pleocroísmo y hábito hojoso de aproximadamente 300 μm que se desarrollan como producto de alteración de cristales tabulares preexistentes de hornblenda, preferencialmente hacia sus bordes (**Figura 35 A y B**).

La epidota se presenta de forma ocasional como cristales subhedrales de tamaño entre 100 y 200 μm , con pleocroísmo débil desde incoloro hasta amarillo pálido y fuertes colores de interferencia que se desarrollan a partir de anfíbol.

Por su parte, la calcita se encuentra tanto en vetillas sinuosas y ramificadas) como sobre cristales de plagioclasa preexistentes, presenta forma anhedral, un rango de tamaños muy variable entre 30 y 120 μm , incoloros en PPL, generalmente con dos direcciones de exfoliación y relieve “basculante”, que presentan fuertes colores de interferencia (**Figura 35 C y D**).

La alteración propilítica se desarrolla como resultado de la introducción de calcio y magnesio y es característica de la reacción de las rocas de caja con fluidos hidrotermales de pH cercano a la neutralidad (Sillitoe, 2000).

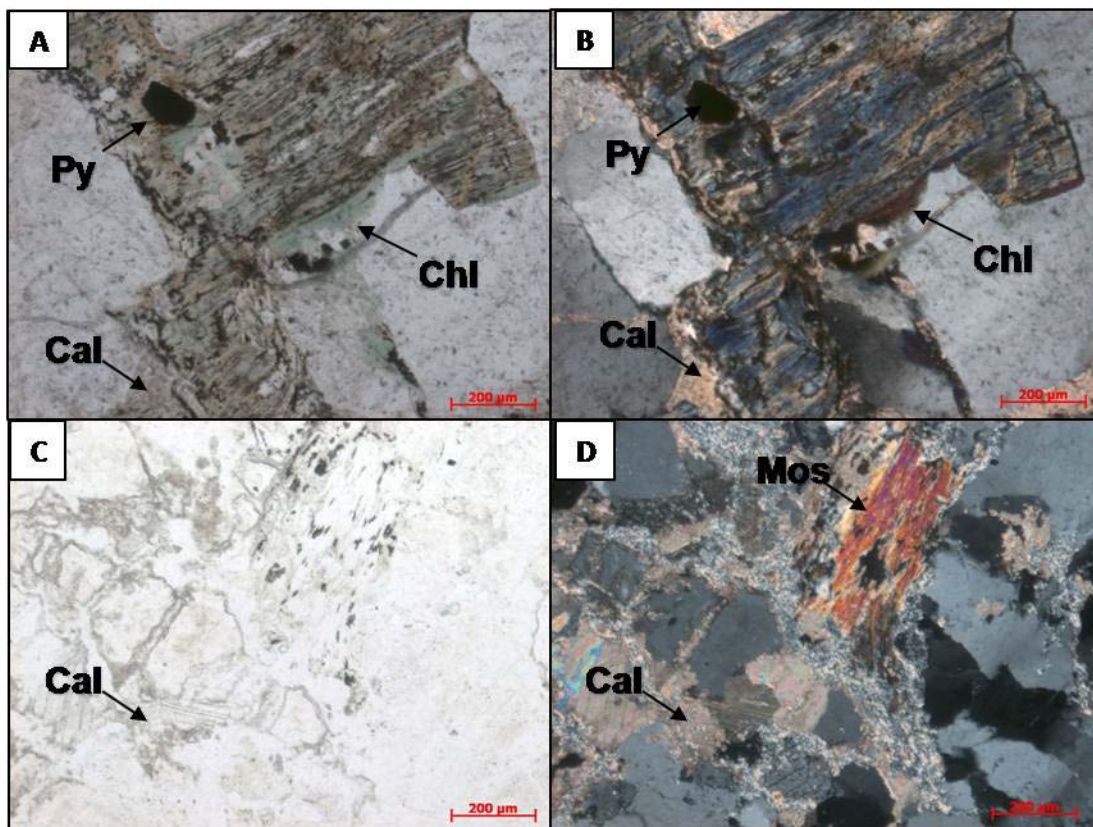


Figura 35. (A) y (B). Cristales de clorita, carbonato y pirita, producto de la alteración de cristales de anfíbol, sección 1265 (C) y (D) Cristales subhedrales de carbonato (Cal) producto de alteración de plagioclasa, obsérvese la presencia de moscovita y cuarzo de alteración filica, sección 1440. Abreviaturas según Kretz (1983).

9.6.2 ALTERACIÓN FÍLICA

La alteración fílica se presenta en todos los sectores estudiados como un halo, generalmente de fuerte a extrema intensidad y de poca extensión (máximo de 50 cm) en los respaldos de las zonas mineralizadas (**Figura 36**). Esta alteración se encuentra muy bien desarrollada y es muy fuerte sobre las rocas del Batolito de Segovia y en aquellos lugares en los que los diques encontrados se presentan como respaldo de las vetas, en donde se caracteriza por un reemplazamiento de la mineralogía y la pérdida de la textura original de la roca caja (**Figura 37**).

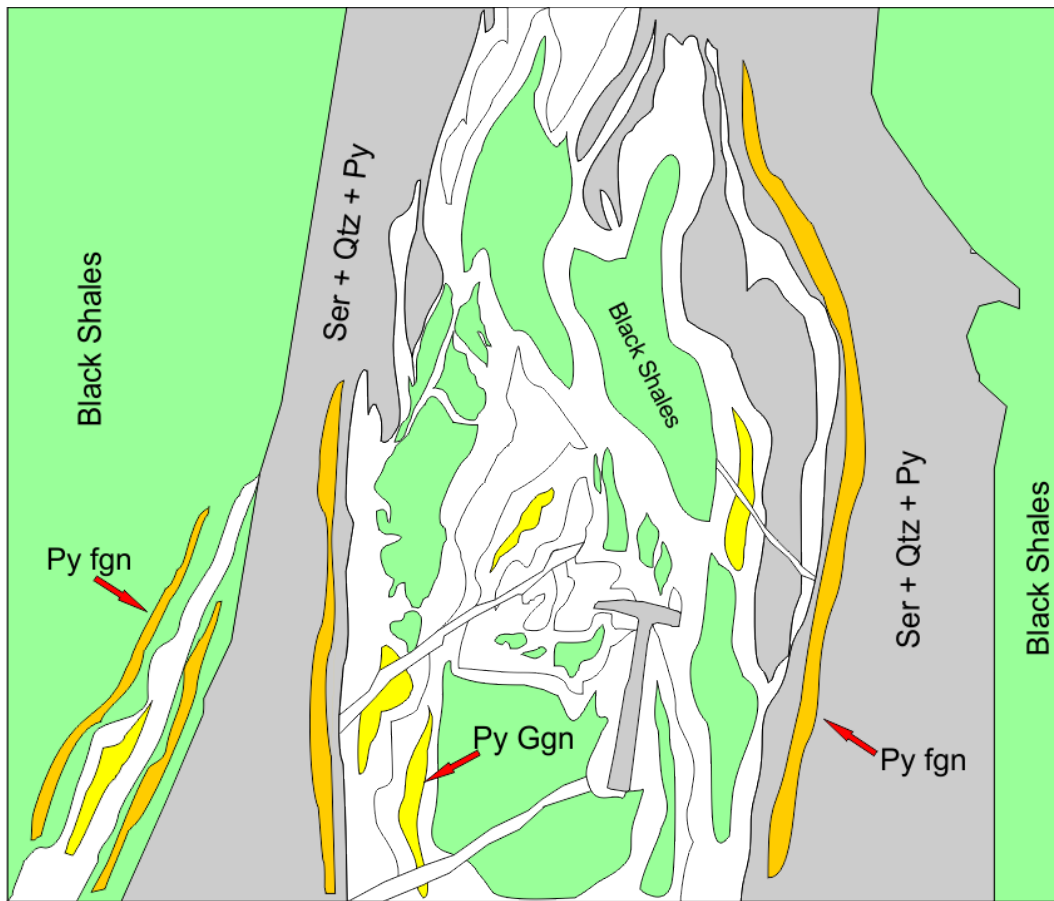


Figura 36. Esquema de distribución de alteración cuarzo + sercitia + pirita de grano fino hacia los respaldos de las zonas mineralizadas, en las Sedimentitas de Segovia, mina La Fortuna.

La alteración fílica está compuesta por la asociación sericita + cuarzo + pirita. La sericita se encuentra como cristales de hábito hojoso a fibroso de tamaño muy variable, desde 5 μm hasta incluso 50 μm , incoloros en PPL pero con colores de interferencia amarillo-verde en PPX, como producto de alteración de cristales preexistentes de plagioclasa y feldespato potásico, pero también rellenando espacios entre cristales de cuarzo, puede representar en algunos casos hasta un 15% del total de los minerales en algunas muestras.

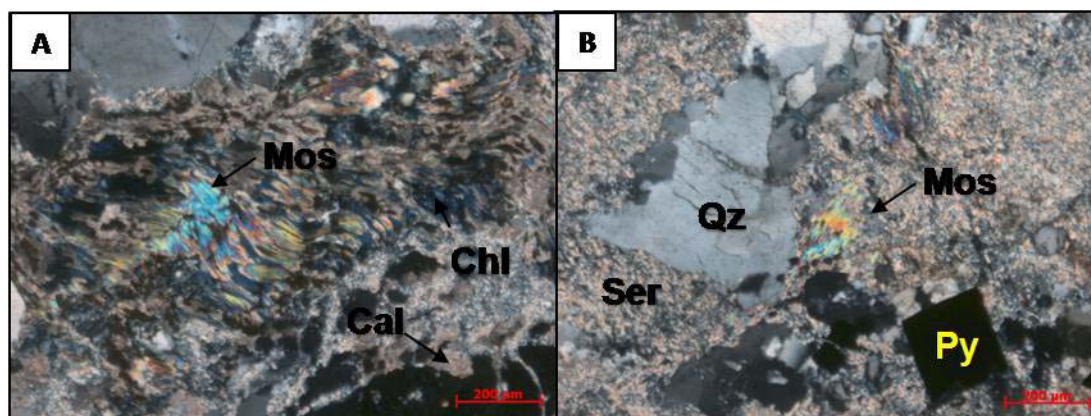


Figura 37. Microfotografías de alteración fílica de intensidad fuerte y pervasiva, que borra la textura original de la roca. A) Sección 1444, mina Las Margaritas, B) sección 1430, mina Cien Puertas. Abreviaturas según Kretz (1983).

El cuarzo asociado con esta alteración se presenta como cristales anhedrales de bordes suturados en agregados con textura mosaico con tamaño variable desde 50 μm hasta 300 μm , que presentan extinción ondulante, característica de deformación en estado sólido.

Por su parte, la pirita asociada a esta alteración se caracteriza por presentarse siempre hacia los respaldos de las zonas mineralizadas, dentro del evento premineral identificado en la secuencia de depósito, presenta un tamaño de grano fino, entre 15 y 20 μm , presentando un color amarillo pálido y forma subidiomórfica.

Los minerales que componen la alteración fílica o cuarzo-sericita son indicativos de reacciones de hidrólisis moderadas a fuertes a partir fluidos hidrotermales de

pH neutro con minerales ricos en potasio y sodio, por lo que los feldespatos son los minerales más propicios a alterarse, generando sericita (moscovita \pm illita) y cuarzo.

9.7 ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Con el fin de identificar con certeza que minerales conforman los ensamblajes de alteración fílica, fueron llevados a cabo análisis de difracción de rayos x de la fracción arcilla en lámina orientada a la que se efectuó tratamiento con etilene glicol. En los difractogramas fue posible detallar que la asociación mineralógica está compuesta por moscovita \pm illita + cuarzo, en algunos casos con caolinita mal cristalizada.

La agudeza de los picos de moscovita (illita?) en los análisis de difracción, relacionados al grado de cristalinidad de dichos minerales, sugiere que éstos se originaron a partir de un proceso primario (evento de alteración hidrotermal) y no son producto de alteración supergénica, lo que confirma las observaciones de campo, que indican que estos minerales constituyen halos de alteración generados por la interacción de fluidos hidrotermales con las rocas de caja.

Los difractogramas obtenidos se incluyen en el **Anexo 1**.

10. FLUIDOS HIDROTERMALES EN EL VAPOR: EVALUACIÓN DE SU COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS

10.1 INTRODUCCIÓN

Determinar las características de los fluidos hidrotermales que dieron origen a un depósito mineral, permite hacer inferencias acerca de los procesos geológicos que actuaron en el momento de su formación y articular la mineralogía y texturas observadas a nivel macroscópico con los factores fisicoquímicos del fluido a partir del cual precipitaron los minerales de mena.

En El Vapor se efectuó el análisis de microtermométrico y espectroscópico de inclusiones fluidas en cristales de cuarzo, con el objetivo de realizar una aproximación a los fluidos hidrotermales mediante la determinación de las variables fisicoquímicas de los mismos: P-T-X-Vm. Las muestras seleccionadas representan el principal evento de mineralización y fueron escogidas de forma que su análisis fuera representativo de las probables variaciones de los fluidos mineralizantes en el rumbo del principal tren de mineralización a ambos lados de la falla El Nús.

10.2 METODOLOGÍA

Un total de seis (6) muestras de zonas mineralizadas, encajadas tanto al occidente como hacia el oriente de la falla El Nús, fueron escogidas para el estudio de inclusiones fluidas (**Figura 38**). En dichas muestras el análisis se centró en el cuarzo con textura masiva, representativo del primer evento de mineralización y al cual se asocia la primera generación de oro electrum.

Los cristales de cuarzo son muy ricos en inclusiones fluidas, agrupadas en “clusters” de inclusiones primarias o alineaciones de inclusiones secundarias, representativas de la historia de circulación de fluidos hidrotermales en El Vapor.

El análisis petrográfico y microtermométrico se llevó a cabo en secciones delgadas doblemente pulidas de entre 110 y 130 μm de espesor en promedio, preparadas por métodos tradicionales, que fueron cortadas en fragmentos pequeños, representativos de las paragénesis encontradas.

Las mediciones microtermométricas de noventa y seis (96) inclusiones fluidas se efectuaron en un equipo Linkham THSM 600 acoplado a un microscopio petrográfico Olympus BX41, que utiliza nitrógeno líquido como medio de enfriamiento y cuyo rango de operación se encuentra entre -195 y $+600^{\circ}\text{C}$. Como medio de calibración fueron utilizados dos estándares con inclusiones sintéticas de H_2O y CO_2 . La exactitud del equipo fue estimada en $\pm 1^{\circ}\text{C}$ para la temperatura más baja y $\pm 4.7^{\circ}\text{C}$ para la más alta.

Durante las rutinas de enfriamiento/calentamiento se registraron seis cambios de fase en las inclusiones fluidas: (1) temperatura de fusión del CO_2 sólido (T_{mCO_2}), (2) temperatura de primera fusión del hielo (T_e), (3) temperatura de fusión final del hielo (T_{mlce}), (4) temperatura de fusión de los clatratos (T_{mClath}), (5) temperatura de homogenización de las fases carbónicas (T_{hCO_2}) y (6) temperatura de homogenización total (T_h), representativa de la temperatura mínima de entrampamiento de las inclusiones.

Se llevaron a cabo mediciones de espectroscopía Raman en algunas inclusiones, tanto de la fase líquida como de vapor, con el objetivo principal de obtener la composición de los volátiles presentes. Las mediciones se llevaron a cabo en un equipo Nicolet Almaga, que utiliza un láser con una longitud de onda 532 nm., ubicado en los laboratorios del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en Denver, Colorado y en el Centro de Desarrollo de la Esmeralda, Bogotá. La identificación de las especies presentes en las inclusiones fluidas se efectuó de

acuerdo a los valores de desviación en la señal establecidas para cada gas y líquido (Burke, 2001; Frezzotti *et al.*,2012).

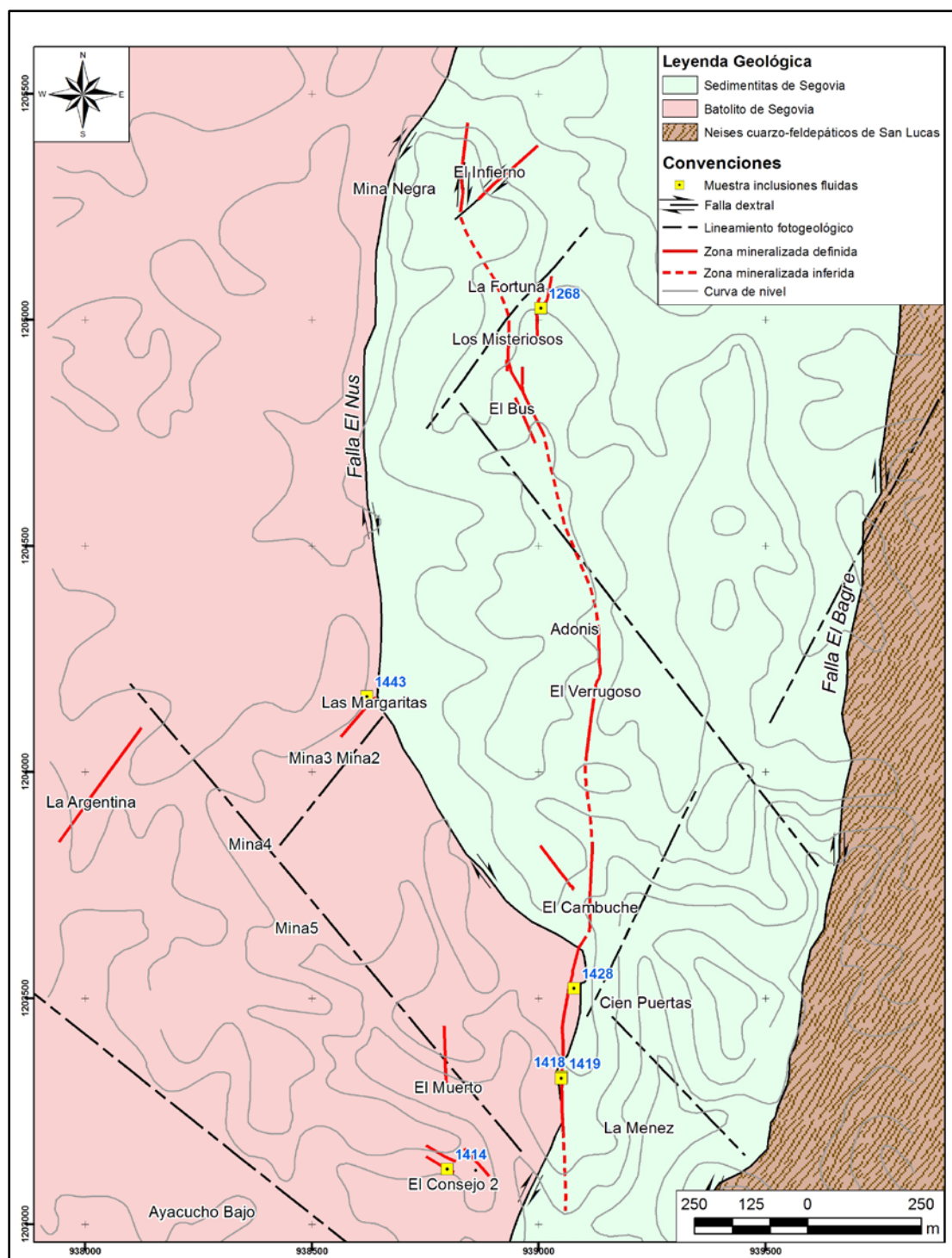


Figura 38. Mapa de ubicación de secciones delgadas doblemente pulidas analizadas.

10.3 PETROGRAFÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS: PARAGÉNESIS Y TIPOS

La clasificación de las inclusiones fluidas se llevó a cabo utilizando los criterios proporcionados por Roedder (1984) para el reconocimiento de inclusiones primarias, pseudosecundarias y secundarias, adicionalmente, se tuvo en cuenta el concepto de FIA (“fluid inclusión assemblage”), definido por Goldstein (2003) como el discriminador petrográfico más fino posible para un grupo de inclusiones fluidas entrampadas al mismo tiempo. En cada una de las muestras analizadas, se efectuó un mapa con el fin de determinar con certeza las relaciones existentes entre las distintas generaciones encontradas (**Figura 39**). Los diagramas de inclusiones fluidas se presentan en el **Anexo 2**.

Las inclusiones primarias corresponden a aquellas atrapadas en zonas de crecimiento generalmente paralelas a los bordes de los cristales o como agrupaciones dispuestas aleatoriamente dentro de ellos. Las pseudosecundarias se localizan en fracturas generadas durante el crecimiento de los mismos, cerradas durante el crecimiento del mineral huésped y no atraviesan los cristales por completo.

En el caso de las inclusiones secundarias, se localizan en fracturas generadas con posterioridad al crecimiento de los cristales y representan fluidos ajenos a su proceso primario de generación.

En El Vapor fue posible identificar cuatro tipos de inclusiones fluidas, utilizando tanto los criterios genéticos descritos, como el número de fases presentes y sus proporciones a temperatura ambiente (25°C). La **Tabla 4** resume las principales características para cada tipo de inclusiones encontradas.

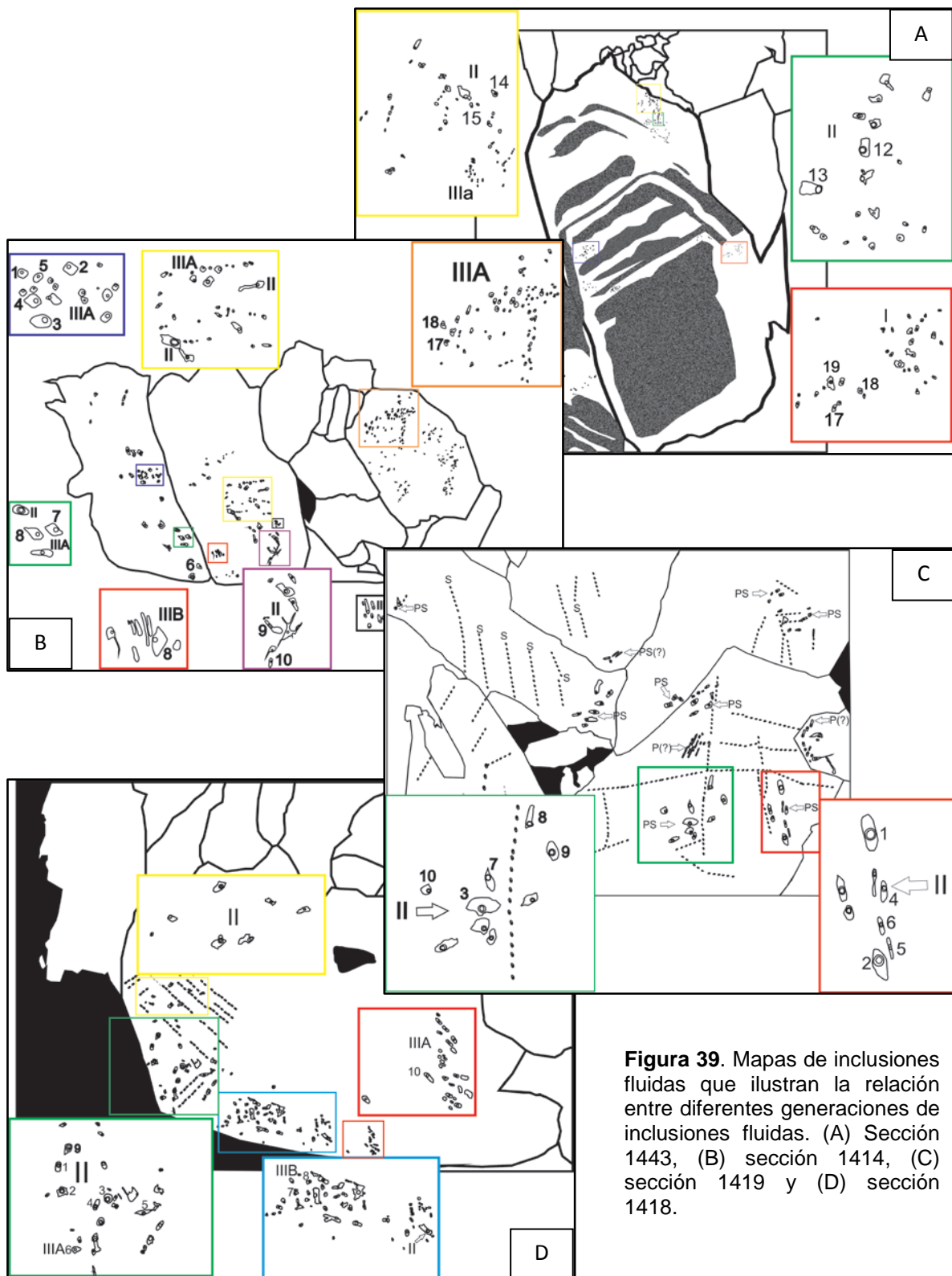


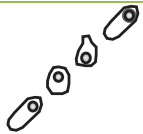
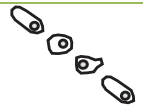



Figura 39. Mapas de inclusiones fluidas que ilustran la relación entre diferentes generaciones de inclusiones fluidas. (A) Sección 1443, (B) sección 1414, (C) sección 1419 y (D) sección 1418.

10.3.1 INCLUSIONES TIPO I

Son inclusiones bifásicas ricas en líquido, poco comunes, con una relación de fases en porcentaje a temperatura ambiente $(\text{CO}_2 \pm \text{N}_{2(?) \pm \text{CH}_4(?))_V / (\text{H}_2\text{O})_L$ desde 6/94 hasta 21/79. Este tipo de inclusiones presenta contornos regulares con una forma ovoide y redondeada, de tamaño pequeño, variable entre 4 y 30 μm .

Paragenéticamente estas inclusiones son primarias, encontrándose restringidas a zonas de crecimiento en los cristales (**Lámina 1A y B**), aunque en algunas muestras se encuentran como grupos aislados en los cuales no se identifica una relación clara con bordes de crecimiento.

Tabla 4. Resumen de las principales características y la clasificación de las inclusiones fluidas en El Vapor.				
Tipo	Fases (25°C)	Origen	Tamaño(μm)	Forma
I	$(\text{CO}_2 \pm \text{N}_{2(?) \pm \text{CH}_4(?))_V + (\text{H}_2\text{O})_L$	Primarias	4-30	
II	$(\text{CO}_2 + \text{N}_2 \pm \text{CH}_4)_V + (\text{CO}_2 \pm \text{H}_2\text{O})_L + (\text{H}_2\text{O})_L$	Primarias a pseudosecundarias	5-42	
IIIa	$\text{H}_2\text{O}_V + \text{H}_2\text{O}_L$	Secundarias	6-26	
IIIb	$\text{H}_2\text{O}_V + \text{H}_2\text{O}_L$	Secundarias	5-16	
IV	$(\text{H}_2\text{O}_V + \text{H}_2\text{O}_L + \text{S})$	Secundarias	12-13	

10.3.2 INCLUSIONES TIPO II

Inclusiones multivolátiles de tres fases a temperatura ambiente $(\text{CO}_2 + \text{N}_2 \pm \text{CH}_4)_V + (\text{CO}_2 \pm \text{H}_2\text{O})_L + (\text{H}_2\text{O})_L$ con una relación de fases ($L_{\text{car}}/L_{\text{aq}}$) en porcentaje variable entre 19/81 y 50/50. Presentan formas variadas desde regulares con bordes

suaves hasta muy irregulares, con bordes dentados. Su tamaño varía entre 5 y 42 μm (**Lámina 1C, D y E**).

Una observación importante es la coexistencia de inclusiones con proporciones diferentes de la fase de vapor carbónico con respecto a la fase de líquido carbónico a temperatura ambiente (25°C), lo que indica densidades variables.

Las inclusiones tipo II son primarias a pseudosecundarias, encontrándose alineadas en fracturas generadas durante el crecimiento de los cristales, que no tocan los bordes de los mismos. En algunas ocasiones se presentan como grupos aislados dispuestos de manera aleatoria en arreglos tridimensionales hacia el centro de los cristales de cuarzo. Coexisten con las inclusiones tipo I.

10.3.2.1 Evidencias de modificaciones post entrapamiento: “necking down” y “stretching” en inclusiones tipo II

En el análisis petrográfico y microtermométrico de inclusiones fluidas siempre es necesario evaluar la posibilidad de encontrar modificaciones, que puedan hacer inválidos los datos obtenidos e imposibiliten realizar interpretaciones ciertas sobre las condiciones de los fluidos y su variación en el tiempo y en el espacio.

En las muestras analizadas de El Vapor, muchas de las inclusiones tipo II, en especial aquellas de tamaño más grande (entre 40 y 50 μm) presentan una geometría muy irregular y en ellas se observan algunas de las características de modificaciones post entrapamiento (**Figura 40**) relacionadas a un proceso de deformación frágil (Bodnar, 2003) y que en el área de estudio, afecta las zonas mineralizadas (probablemente relacionado con el fracturamiento entre los eventos dos y tres de mineralización (**Figura 33**)).

A pesar de lo anterior, las evidencias de procesos de modificación no son visibles en muchas de las inclusiones tipo II, particularmente en aquellas de tamaño más pequeño, por lo que se realizó con mucho cuidado un proceso de escogencia de inclusiones para ser medidas, que fue validado por el hecho que las temperaturas

relacionadas a los cambios de fase en inclusiones que pertenecen a la misma población, con proporciones de fase iguales, presentan variaciones de solamente pocos grados centígrados entre ellas.

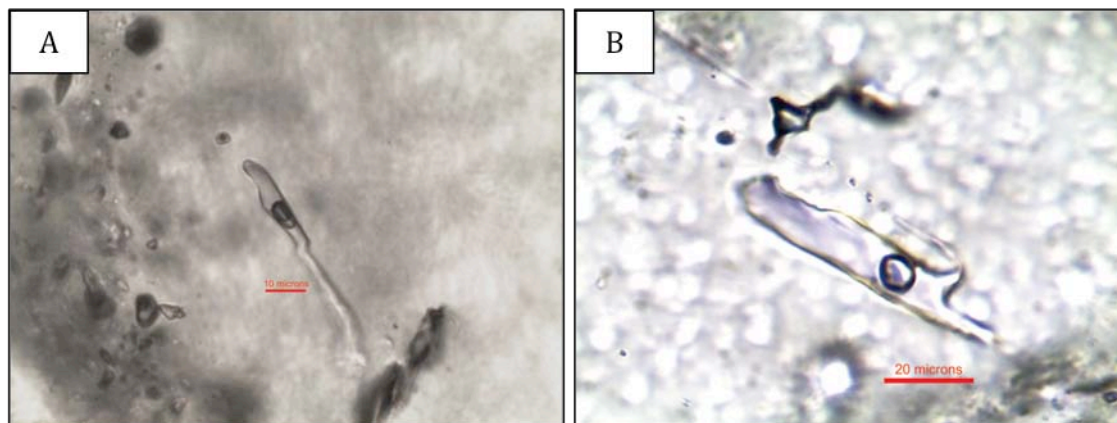


Figura 40. Evidencias de modificaciones post entrapamiento en inclusiones tipo II en El Vapor. A) "stretching" y B) "necking down". Sección 1419.

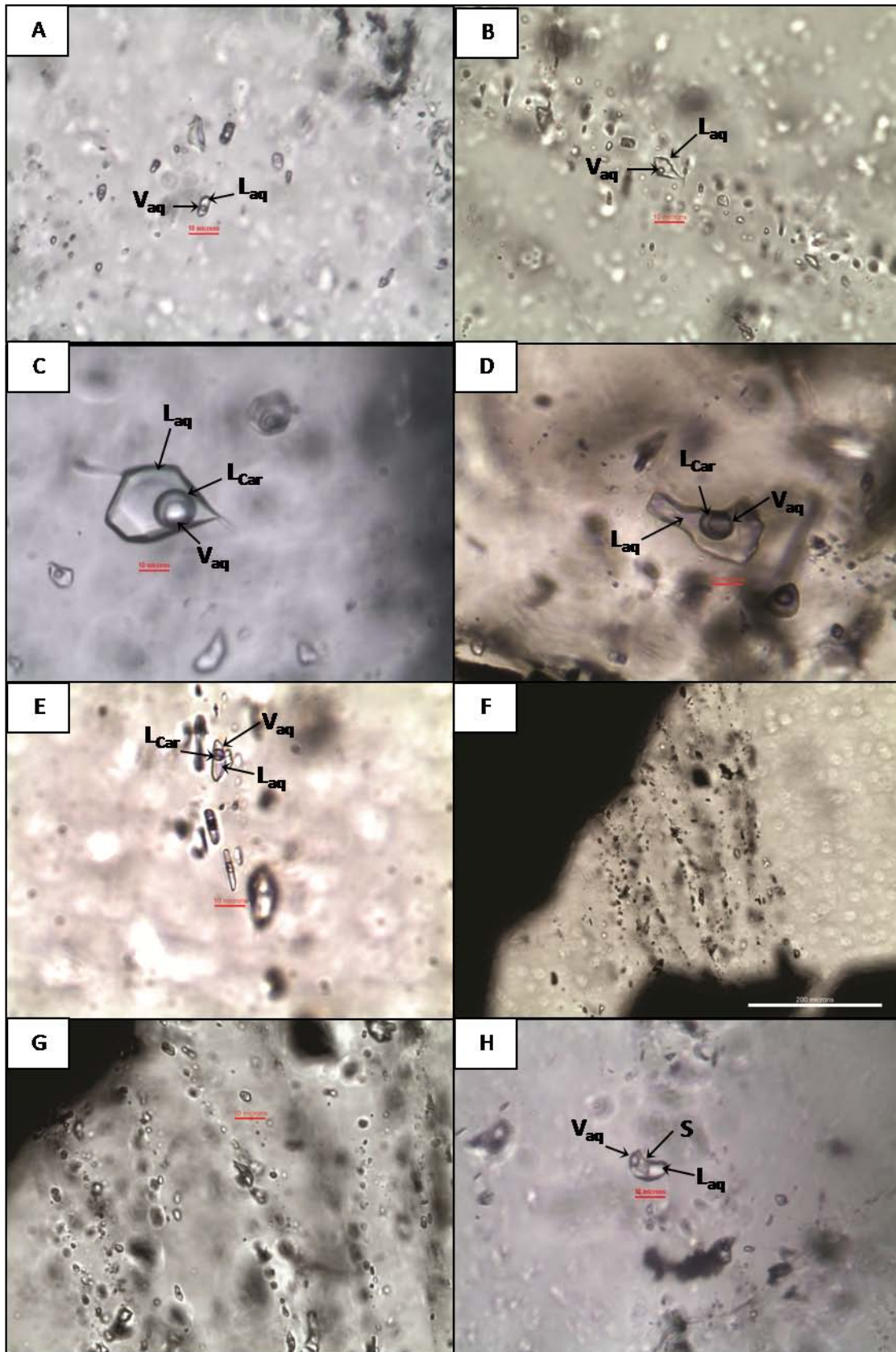
10.3.3 INCLUSIONES TIPO III

A este tipo de inclusiones se asignaron aquellas más numerosas, bifásicas ricas en líquido, subdivididas en IIIa y IIIb teniendo en cuenta su temporalidad. Las inclusiones tipo IIIa presentan una relación de fases en porcentaje (H_2O_V/H_2O_L) a temperatura ambiente entre 8/92 y 18/82, mientras que en las inclusiones tipo IIIb, esta relación varía entre 7/93 y 11/89, su tamaño varía entre 6 y 26 μm y entre 5 y 16 μm respectivamente. En ambos casos presentan formas regulares, generalmente ovoides con bordes suaves.

Las inclusiones de tipo III son claramente secundarias, presentándose alineadas en fracturas que en algunos casos atraviesan por completo los minerales huésped, tocando los bordes de los cristales (**Lámina 1F y G**).

Lámina 1.

- (A) *Inclusiones primarias tipo I, bifásicas ricas en líquido. Sección 1443.*
- (B) *Inclusiones primarias tipo I, bifásicas ricas en líquido alineadas, paralelas a zonas de crecimiento de cristales de cuarzo masivo. Sección 1443.*
- (C) *Inclusiones primarias tipo II de gran tamaño, con tres fases a temperatura ambiente. Sección 1418.*
- (D) *Inclusiones pseudosecundarias tipo II, con tres fases a temperatura ambiente. Sección 1428(b).*
- (E) *Inclusiones tipo II, alineadas, pseudosecundarias, con tres fases a temperatura ambiente. Sección 1419.*
- (F) *Inclusiones secundarias tipo III, alineadas en fracturas que atraviesan por completo cristales de cuarzo. Sección 1418.*
- (G) *Detalle de inclusiones secundarias tipo III, alineadas en fracturas que atraviesan por completo cristales de cuarzo. Sección 1418.*
- (H) *Inclusión tipo IV, secundaria (?), con tres fases a temperatura ambiente. Este tipo de inclusiones es muy escaso en El Vapor. Sección 1414.*



10.3.4 INCLUSIONES TIPO IV

Son inclusiones muy escasas en El Vapor y presentan tres fases a temperatura ambiente con presencia de minerales hijos ($H_2O_V + H_2O_L + S$), que no pudieron ser identificados petrográficamente (**Lámina 1H**). Su relación de fases en porcentaje (H_2O_V/H_2O_L) varía entre 4/96 y 12/88 y su tamaño entre 12 y 13 μm . Presentan formas regulares, ovoides, de contornos suaves.

No clara la temporalidad de estas inclusiones, aunque en algunas muestras se observaron asociadas a inclusiones tipo III, rellenando fracturas, por lo que se asume que son secundarias.

10.4 ANÁLISIS MICROTERMOMÉTRICO DE INCLUSIONES FLUIDAS EN EL VAPOR

10.4.1 ANÁLISIS MICROTERMOMÉTRICO DE INCLUSIONES TIPO I

Las inclusiones tipo no exhiben temperaturas de fusión de CO_2 sólido y el primer cambio de fase observado corresponde a la temperatura de primera fusión del hielo (T_e) que varía entre -21 y $-22.8^\circ C$ (**Figura 41C**), indicando que las sales disueltas en el sistema acuoso corresponden a una mezcla entre NaCl y KCl. Las temperaturas de primera fusión representan el valor mínimo de esta transición de fase, pues la presencia de clatratos dificulta el reconocimiento de la misma (Diamond, 1990;1994).

El segundo cambio de fase observado corresponde a la temperatura de fusión final del hielo (T_{mIce}) que se encuentra entre -2.8 y $-10.2^\circ C$ (**Figura 41D**).

Un tercer cambio de fase fue observado en este tipo de inclusiones entre $+4.5$ y $+8.8^\circ C$ como un estremecimiento muy fuerte de la burbuja de vapor (**Figura 41F**), que se interpreta como la temperatura de fusión de clatratos (T_{mClath}) y que es indicativa de la presencia de CO_2 y probablemente $CH_4 \pm N_2$ en la fase de vapor.

Todas las inclusiones de este tipo homogenizan totalmente (T_h) por desaparición de la fase de vapor ($L+V \rightarrow L$) en un rango de temperaturas entre 236.2 y 349.8°C (**Figura 41I**).

La salinidad para este tipo de inclusiones fue calculada con base en las temperaturas de fusión de los clatratos (T_{mClath}) y no en las temperaturas de fusión final del hielo, pues se ha demostrado que la presencia de hidratos de gas produce un entrampamiento selectivo de las moléculas de agua en la fase acuosa y una repulsión de cualquier sal o iones en solución, de manera que el líquido residual resultante es comparativamente mucho más salino (Collins, 1979; Diamond, 2001).

Los resultados microtermométricos de las inclusiones tipo I se resumen en las **Figuras 42, 45, 46 y 48** y se presentan en el **Anexo 3.1**.

El cálculo de la salinidad, la densidad, composición y el volumen molar para las inclusiones tipo I en El Vapor se realizó mediante la utilización del programa ICE (Bakker, 1997; Bakker & Brown, 2003), utilizando la ecuación de estado de Peng & Robinson (1976), con base en los datos de T_{mClath} , T_{mIce} , la composición de la fase no acuosa, que corresponde solamente a CO_2 (confirmado con datos espectroscópicos), el tipo de sales en términos de NaCl (100%) y un estimativo de los volúmenes de las fases presentes justo después de la fusión de los clatratos. Los resultados se resumen en la **Tabla 5**.

Las inclusiones tipo I en El Vapor, presentan una salinidad variable entre 4.1 y 4.9 wt % NaCl equiv, con una densidad entre 0.82 y 0.93 g/cc y volumen molar con valores entre 20.7 y 23.4 cc/mol.

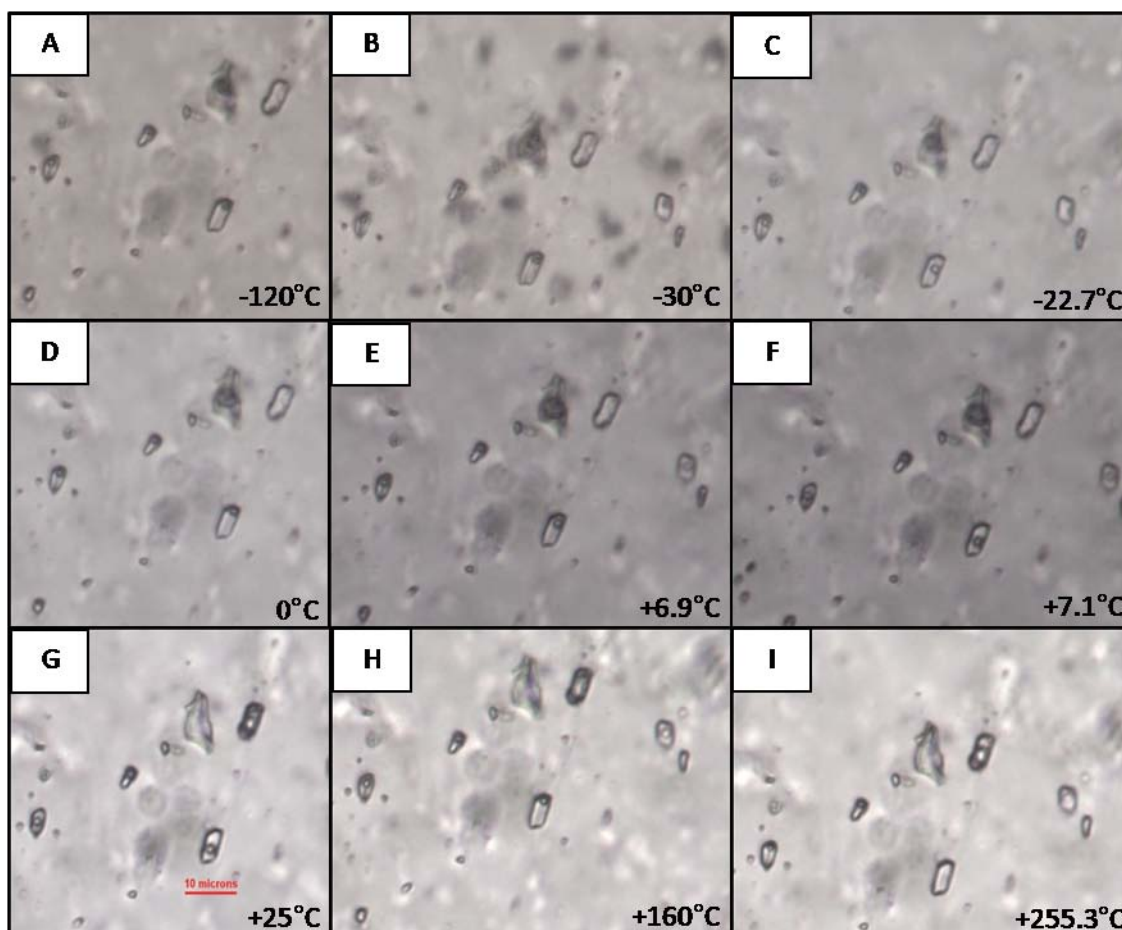


Figura 41. Ejemplo de rutina de análisis microtermométrico en una inclusión de tipo I, en la que se observan cinco transiciones de fase. La fusión final del hielo en este caso ocurrió en -6.8°C Sección 1443.

Debido a la necesidad de contar con un estimativo volumétrico de las fases presentes en las inclusiones para calcular los parámetros de composición de las mismas, estimación realizada a partir de observaciones en dos dimensiones de rasgos tridimensionales, existe un error intrínseco en los cálculos que es significativamente mayor en inclusiones con una fase de vapor grande (Bakker & Diamond, 2000; 2006). Sin embargo, considerando que las inclusiones tipo I en El Vapor, presentan una fase de vapor generalmente pequeña en comparación con la fase líquida, los efectos de la propagación de errores en la estimación de la composición se consideran relativamente pequeños para el propósito del presente estudio.

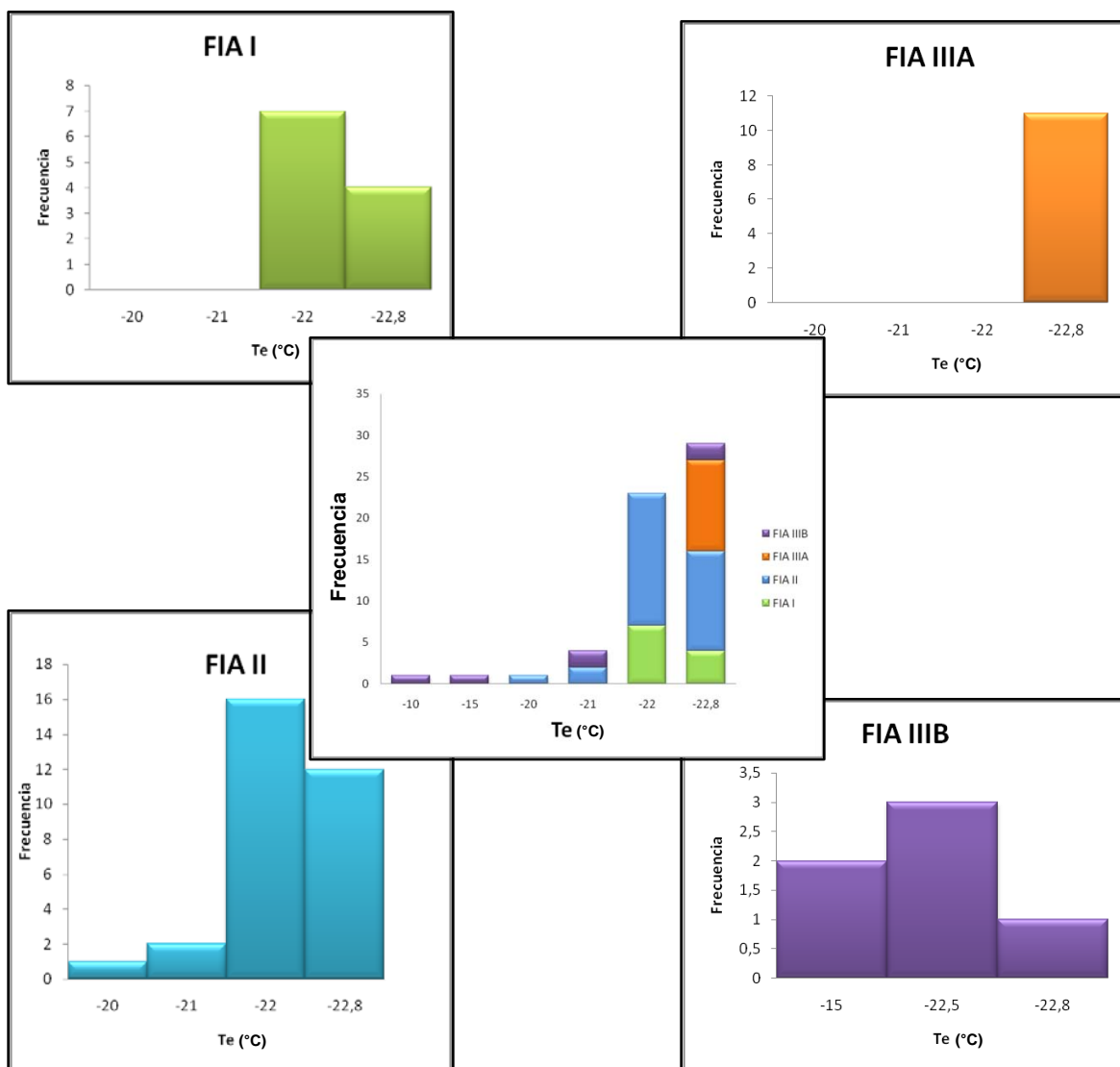


Figura 42. Histogramas de frecuencia para la temperatura de primera fusión (Te) en los distintos tipos de inclusiones encontradas en El Vapor.

10.4.2 ANÁLISIS MICROTERMOMÉTRICO DE INCLUSIONES TIPO II

Seis transiciones de fase fueron observadas durante los ciclos de enfriamiento y calentamiento de las inclusiones tipo II. La fusión del CO₂ (T_{mCO₂}) ocurre en temperaturas entre -53.4 y -60.3°C, con un pico en -57.5°C (**Figuras 43 y 44B**), revelando que en la fase gaseosa se presentan además de CO₂, N₂ y CH₄, observación que fue confirmada por los análisis de espectroscopía Raman.

Tabla 5. Propiedades calculadas de las inclusiones tipo I, obtenidas con el programa ICE (Bakker, 1997; Bakker & Brown, 2003)

Muestra	Chip	N° inclusión	Salinidad (wt% NaCl equiv)	Densidad (g/cc)	Vm (cc/mol)	X(H ₂ O)	X(CO ₂)	X(Na ⁺)	X(Cl ⁻)
1428(b)	10-3	10	4,1370	0,8866	21,3803	0,9562	0,0391	0,0023	0,0023
1428(b)	10-1	15	4,8904	0,8275	23,1478	0,9115	0,0527	0,0149	0,0149
1419	11-2	34	4,6202	0,9257	20,8093	0,9361	0,0359	0,0140	0,0140
1419	13-1	40	4,8453	0,9063	21,1370	0,9393	0,0312	0,0147	0,0147
1419	13-2	43	4,8948	0,9184	20,8112	0,9408	0,0294	0,0149	0,0149
1419	13-2	44	4,9030	0,9147	20,9039	0,9405	0,0296	0,0149	0,0149
1443	7-2	74	4,5737	0,8802	21,8490	0,9375	0,0349	0,0138	0,0138
1443	7-2	75	4,5102	0,8612	22,3477	0,9372	0,0355	0,0136	0,0136
1443	7-2	76	4,3754	0,8652	22,3353	0,9346	0,0390	0,0132	0,0132
1443	7-2	77	4,5439	0,8811	21,8482	0,9369	0,0356	0,0137	0,0137
1443	14-1	79	4,5048	0,9294	20,7008	0,9374	0,0354	0,0136	0,0136
1443	14-1	82	4,5036	0,8909	21,6070	0,9370	0,0358	0,0136	0,0136
1443	14-1	83	4,4347	0,8216	23,4249	0,9374	0,0358	0,0134	0,0134
1443	14-1	84	4,4576	0,8263	23,2847	0,9375	0,0355	0,0135	0,0135
1443	14-2	86	4,6591	0,9055	21,1345	0,9407	0,0310	0,0142	0,0142
1268	3-1	95	4,3321	0,8449	22,8614	0,9351	0,0388	0,0130	0,0130

La temperatura de primera fusión del subsistema acuoso (T_e) en las inclusiones tipo II se presenta en un rango entre -18.9 y -22.8°C, indicativa, al igual que en el caso de las inclusiones tipo I, de la presencia de KCl y NaCl (**Figura 44C**). De la misma forma, la presencia de clatratos dificulta el reconocimiento del momento exacto en el que se forma la primera gota de material fluido en las inclusiones. Por lo anterior, los datos de primera fusión representan los valores mínimos.

La observación de la temperatura de fusión final del hielo (T_{mIce}) en las inclusiones tipo II, fue en algunos casos difícil, sin embargo fue posible determinar que ésta varía entre -1.9 y -8°C, con una mayor concentración de los datos en -4 a -5°C y en -7°C (**Figura 44E**).

Un cambio de fase que se manifiesta de forma muy notoria en la mayoría de las inclusiones de este tipo, corresponde a la fusión de los clatratos (T_{mClath}) que en casi todas las muestras ocurre en uno de los puntos cuádruplos de equilibrio (Q_2) del sistema y en el cual los clatratos se disocian y las inclusiones entran en el campo de inmiscibilidad de las fases carbónicas, por lo que a partir de este punto

se observan dos fases carbónicas ($T_{mCl}: L_{aq} L_{car} V \rightarrow L_{aq} L_{car} V$) (**Figura 44G**). Las temperaturas de fusión de los clatratos en las muestras analizadas varían entre +5.1 y +8.2 °C, con una concentración de datos en +6.5°C.

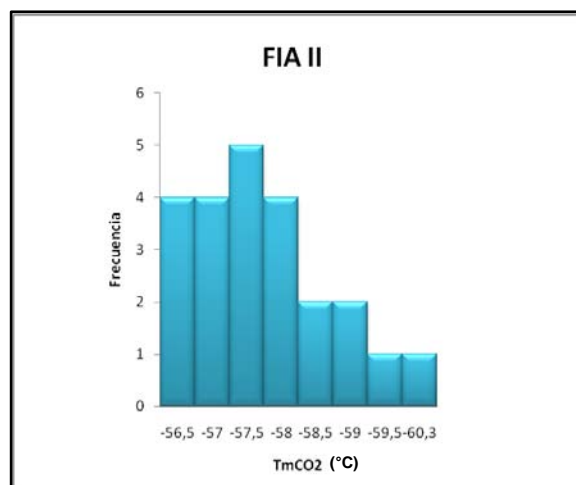


Figura 43. Histograma de frecuencia para la temperatura de fusión del CO₂ sólido (T_{mCO_2}) en las inclusiones tipo II.

Una quinta transición de fase durante las etapas de calentamiento de las inclusiones tipo II, corresponde a la homogenización de las fases carbónicas ($L_{aq} L_{car} V \rightarrow L_{aq} L_{car}$), lo que en la gran mayoría de los casos ocurre por la desaparición de la fase de vapor y que se observa como un recogimiento de la burbuja más pequeña (**Figura 44I**), de manera que este cambio de fase se produce por una transición que atraviesa la “bubble curve” (Diamond, 2001). Solamente en un caso se observó homogenización de las fases carbonosas a vapor. Las temperaturas de homogenización de las fases carbónicas varían entre +23.6 y +30.9 °C con una mayor cantidad de datos en +30°C.

El último cambio de fase observado corresponde a la homogenización total de las inclusiones (T_h), que en todos los casos medidos se produce por el encogimiento progresivo, seguido de la desaparición de la fase de líquido carbónico y la formación de un fluido supercrítico (**Figura 44L**). Esta transición de fase ocurre en

El Vapor, para este tipo de inclusiones entre 214 y 306 °C, con un pico centrado en 250°C.

Los resultados microtermométricos de las inclusiones tipo II se resumen en las **Figuras 42, 43, 45, 46, 47 y 48** y se presentan en el **Anexo 3.2**.

El cálculo de la composición, densidad y salinidad de las inclusiones tipo II se realizó mediante el programa Q₂ (Bakker, 1997; Bakker & Brown, 2003) utilizando la ecuación de estado de Peng & Robinson (1976), que utiliza como datos de entrada la temperatura de fusión de los clatratos, la temperatura de homogenización de las fases no acuosas (carbónicas), la composición de las fases no acuosas ($X_{CO_2}= 0.96$, $X_{N_2}=0.04$, referida a los análisis de espectroscopía Raman), la composición de las sales (en términos de NaCl 100%) y opcionalmente, la proporción de las fases a temperatura ambiente.

Aunque no es un requisito del programa introducir la proporción de las fases, sin este parámetro no se puede calcular la composición total de las inclusiones, necesarias para la construcción de isócoras y la estimación de la presión mínima de entrapamiento. De nuevo, existen errores implícitos en la estimación de fracciones volumétricas a partir de datos de área, que pueden incrementarse con el tamaño de la fase carbónica a temperatura ambiente. Los resultados de los cálculos efectuados a partir de las mediciones microtermométricas se presentan en la **Tabla 6**.

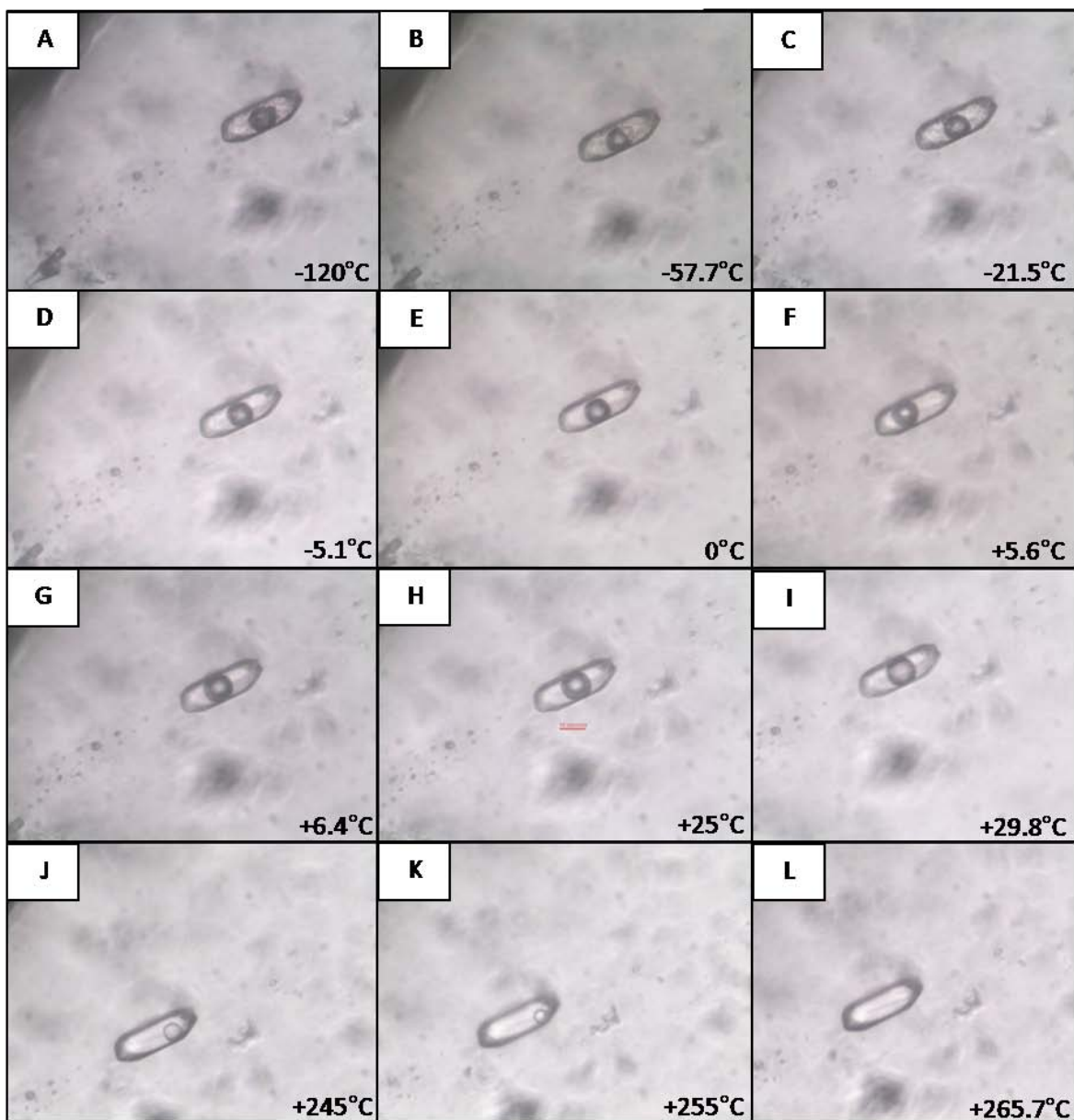


Figura 44. Rutina de análisis microtermométrico en una inclusión de tipo II, en la que se observan seis transiciones de fase. La fusión final del hielo en este caso ocurrió en -3.2°C . Sección 1419.

Las inclusiones tipo II en El Vapor presentan una salinidad variable entre 3.5 y 9.2wt % NaCl equiv (6.4 en promedio), con una densidad entre 0.75 y 0.97 g/cc (0.94 en promedio) y un volumen molar entre 19.3 y 37.9 cc/mol (21 en promedio).

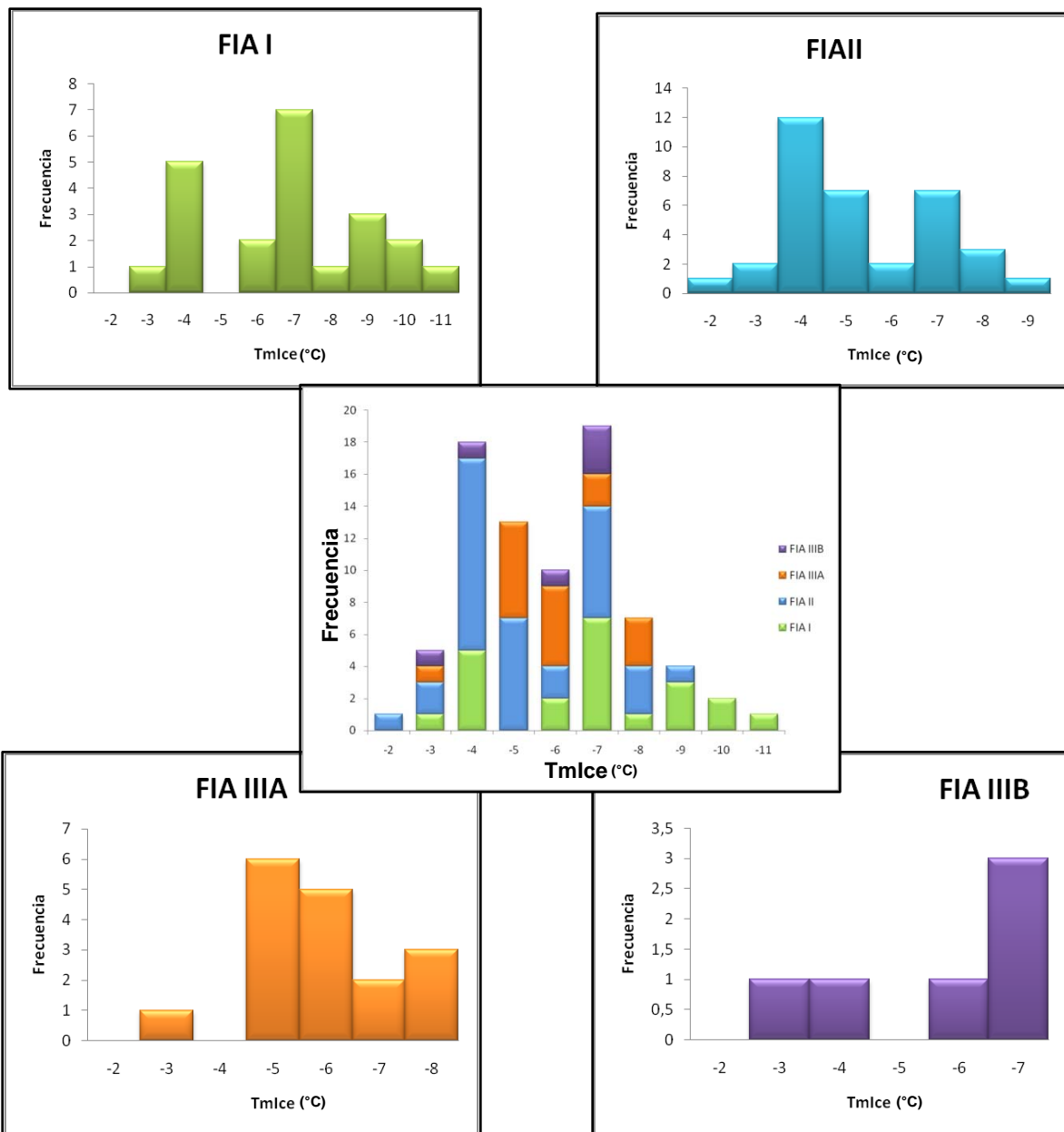


Figura 45. Histogramas de frecuencia para la temperatura de fusión final del hielo (T_{mIce}) en los distintos tipos de inclusiones encontradas en El Vapor.

10.4.3 ANÁLISIS MICROTERMOMÉTRICO DE INCLUSIONES TIPO III

En el caso de las inclusiones bifásicas ricas en líquido del tipo III, se reconocieron tres cambios de fase correspondientes a la primera fusión del hielo (T_e), fusión final del hielo (T_{mice}) y temperatura de homogenización total (T_h). En el primer caso, las temperaturas de las inclusiones tipo IIIa, varían entre -22.1 y -22.8°C, mientras que en las inclusiones tipo IIIb, se encuentran entre -10 y -22.2°C. En ambos casos, es notorio que en la fase acuosa se presenta una mezcla de NaCl y KCl, siendo esta última especie muy notoria en algunas temperaturas registradas en inclusiones tipo IIIb.

Tabla 6. Propiedades calculadas de las inclusiones tipo II, obtenidas con el programa Q2 (Bakker, 1997; Bakker & Brown, 2003)

Muestra	Chip	Nº inclusión	Salinidad (wt% NaCl equiv)	Densidad (g/cc)	Vm (cc/mol)	X(H ₂ O)	X(CO ₂)	X(N ₂)	X(Na+)	X(Cl-)
1428(b)	10-1	1	9,2304	0,9338	20,7271	0,8785	0,0647	0,0018	0,0275	0,0275
1428(b)	10-1	2	6,9003	0,9481	20,3301	0,8992	0,0582	0,0015	0,0205	0,0205
1428(b)	10-1	3	7,4457	0,963	19,5984	0,9101	0,0439	0,0009	0,0226	0,0226
1428(b)	10-3	4	7,6316	0,9591	19,7607	0,9056	0,0472	0,001	0,0231	0,0231
1428(b)	10-3	5	8,3465	0,9539	19,8994	0,899	0,0494	0,0011	0,0252	0,0252
1428(b)	10-3	7	6,719	0,9653	19,5834	0,9145	0,044	0,0009	0,0203	0,0203
1428(b)	10-3	8	7,2704	0,9398	20,7153	0,8892	0,066	0,0018	0,0215	0,0215
1428(b)	10-3	9	6,9061	0,932	21,1476	0,883	0,0745	0,0022	0,0202	0,0202
1428(b)	10-3	11	5,8042	0,9602	19,9255	0,9129	0,0512	0,0173	0,0012	0,0173
1428(b)	10-3	13	7,6263	0,9485	20,23	0,897	0,056	0,0228	0,0014	0,0228
1428(b)	10-1	14	8,8837	0,9354	20,7284	0,8799	0,0654	0,0264	0,0018	0,0264
1428(b)	10-5	17	5,8042	0,9586	19,9987	0,9115	0,0527	0,0173	0,0012	0,0173
1418	3-1	18	7,9909	0,9637	19,5096	0,9084	0,0421	0,0008	0,0243	0,0243
1418	3-1	19	6,7243	0,75	37,9051	0,5585	0,4006	0,0161	0,0124	0,0124
1418	3-1	20	5,245	0,9271	21,5925	0,8837	0,0836	0,0025	0,0151	0,0151
1418	3-1	22	7,4489	0,9586	19,797	0,9061	0,0479	0,0011	0,0225	0,0225
1418	3-1	26	6,9061	0,9672	19,487	0,9151	0,0422	0,0008	0,0209	0,0209
1418	11-1	28	7,2684	0,9518	20,134	0,9006	0,0546	0,0013	0,0218	0,0218
1418	11-1	29	6,9041	0,9514	20,1935	0,9016	0,0558	0,0014	0,0206	0,0206
1418	11-1	30	7,0868	0,9569	19,9213	0,9058	0,0505	0,0012	0,0213	0,0213
1418	11-1	31	7,8098	0,9658	19,436	0,9109	0,0408	0,0008	0,0238	0,0238
1418	11-1	32	7,4496	0,9448	20,44	0,8937	0,0604	0,0016	0,0222	0,0222
1419	13-1	37	8,1702	0,943	20,4421	0,8895	0,0602	0,0016	0,0244	0,0244
1419	13-1	38	7,4502	0,9511	20,1443	0,8993	0,0547	0,0013	0,0223	0,0223

Tabla 6. Continuación.

Muestra	Chip	Nº inclusión	Salinidad (wt% NaCl equiv)	Densidad (g/cc)	Vm (cc/mol)	X(H ₂ O)	X(CO ₂)	X(N ₂)	X(Na ⁺)	X(Cl ⁻)
1419	13-1	41	7,2711	0,9635	19,6083	0,9106	0,0445	0,0009	0,022	0,022
1419	13-2	45	6,9009	0,9483	20,3237	0,8993	0,0581	0,0015	0,0205	0,0205
1419	13-2	46	7,4516	0,9607	19,7097	0,9076	0,0463	0,001	0,0225	0,0225
1414	10-2	55	4,5433	0,9667	19,9232	0,9177	0,0541	0,0013	0,0135	0,0135
1414	4-2	58	4,4085	0,9486	20,7053	0,9042	0,0683	0,0018	0,0129	0,0129
1414	4-2	59	4,8005	0,9479	20,7688	0,8996	0,0705	0,0019	0,014	0,014
1414	4-2	60	3,5489	0,9513	20,5924	0,9125	0,0651	0,0017	0,0103	0,0103
1414	4-2	62	3,5476	0,964	20,0061	0,9242	0,0537	0,0012	0,0105	0,0105
1443	7-2	68	6,3501	0,9729	19,2959	0,9222	0,0386	0,0006	0,0193	0,0193
1443	7-2	72	5,0525	0,9739	19,3992	0,9277	0,0411	0,0007	0,0152	0,0152
1443	7-2	73	5,613	0,9741	19,3308	0,9258	0,0396	0,0007	0,017	0,017
1443	14-1	78	5,7996	0,9424	20,7399	0,8975	0,0667	0,0018	0,017	0,017
1443	14-1	80	6,1694	0,9716	19,3764	0,9217	0,0403	0,0007	0,0187	0,0187
1443	14-1	85	5,0589	0,7511	37,7794	0,5683	0,3971	0,0159	0,0093	0,0093
1268	3-1	93	5,4267	0,9334	21,2118	0,8906	0,0757	0,0022	0,0157	0,0157
1268	3-1	94	6,5407	0,9618	19,7675	0,9118	0,0478	0,001	0,0197	0,0197

Las temperaturas de fusión final de hielo varían entre -2.8 y -7.6°C para las inclusiones tipo IIIa y entre -2 y -6.4°C para las inclusiones tipo IIIb.

Todas las inclusiones observadas homogenizan a un fluido supercrítico por contracción de la fase de vapor ($V_{L_{aq}} \rightarrow F_{sc}$), en un rango de temperaturas entre 159 y 209°C para las inclusiones tipo IIIa y entre 131 y 168°C para las inclusiones tipo IIIb.

Los resultados microtermométricos de las inclusiones tipo III se resumen en las **Figuras 42, 45, 48** y se presentan en el **Anexo 3.3**.

Los cálculos de la composición de las inclusiones tipo III se realizaron mediante la utilización del programa BULK del paquete Fluids (Bakker, 1997; Bakker & Brown, 2003), utilizando ecuaciones empíricas para el cálculo de salinidad propuestas por Bodnar (1993) y la ecuación de estado de Zhang & Frantz (1987) para la estimación de la cantidad de los componentes en las inclusiones. Los resultados de los cálculos efectuados se resumen en la **Tabla 7**.

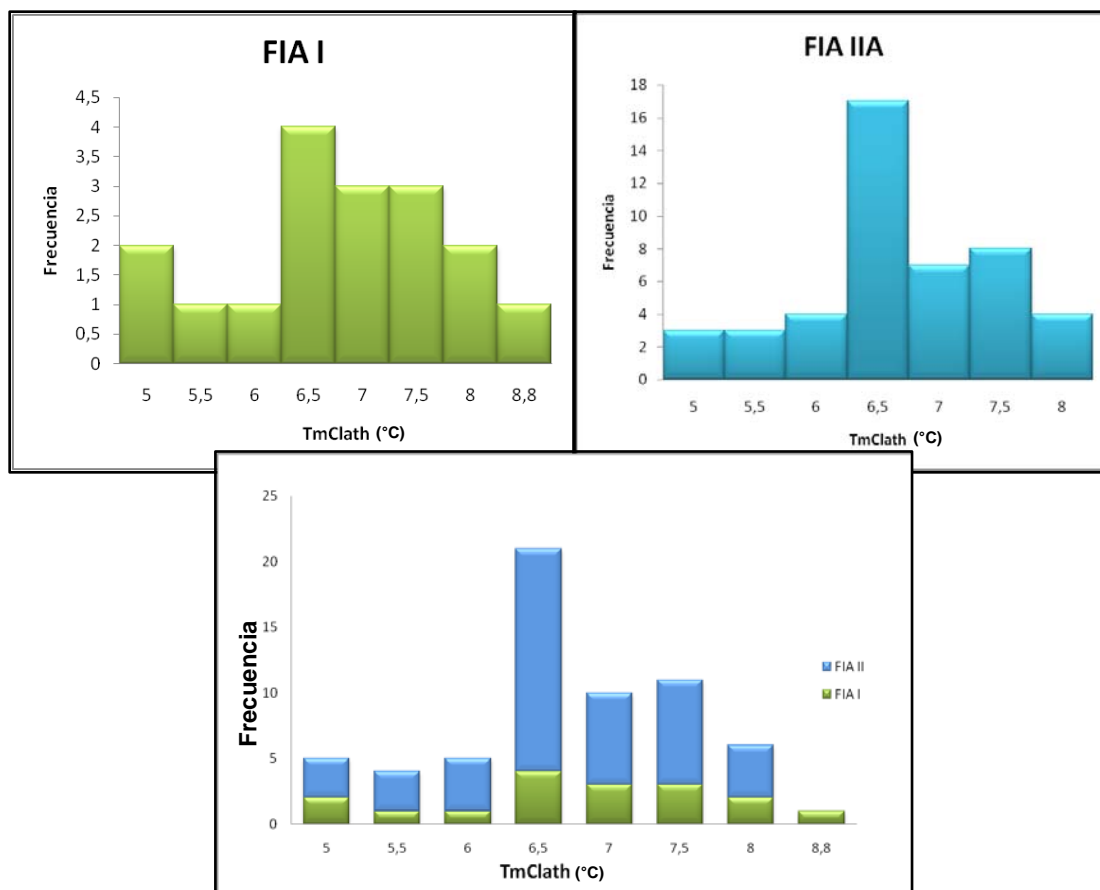


Figura 46. Histogramas de frecuencia para la temperatura de fusión de clatratos (T_{mClath}) en las inclusiones de los tipos I y II.

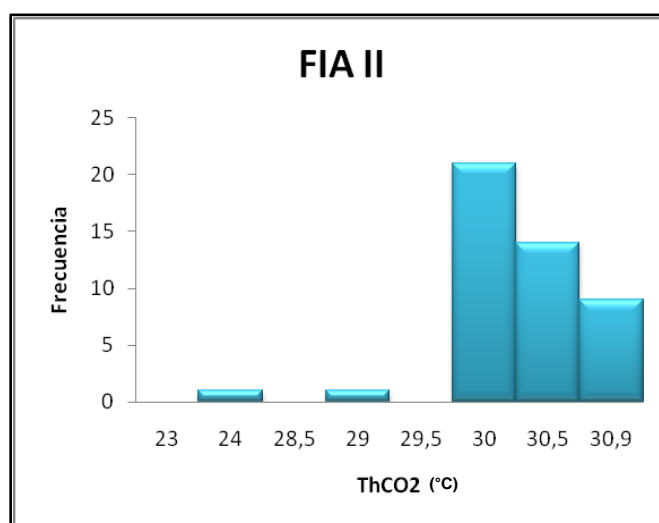


Figura 47. Histograma de frecuencia para la temperatura de homogenización de las fases carbónicas (T_{hCO2}) en las inclusiones de tipo II.

Los valores de salinidad, expresados en función de NaCl, varían entre 4.6 y 11.2 wt % NaCl equiv para inclusiones tipo IIIa y entre 3.4 y 9.7 wt % NaCl equiv para inclusiones tipo IIIb. Mientras que los valores de densidad varían entre 1.07 y 1.08 g/cc y entre 1.02 y 1.07 g/cc respectivamente. El volumen molar se encuentra en un rango de 17.4 a 17.8 cc/mol para las inclusiones IIIa y 17.5 a 17.8cc/mol para las inclusiones IIIb.

Tabla 7. Propiedades calculadas de las inclusiones tipo III, obtenidas con el programa BULK (Bakker, 1997; Bakker & Brown, 2003)									
Muestra	Chip	N° inclusión	Tipo	Salinidad (wt% NaCl equiv)	Densidad (g/cc)	Vm (cc/mol)	X(H₂O)	X(Na⁺)	X(Cl⁻)
1418	3-1	23	IIIA	7,865	1,054	17,617	0,950	0,025	0,025
1418	3-2	27	IIIA	8,139	1,057	17,594	0,948	0,026	0,026
1418	11-2	35	IIIA	11,220	1,079	17,444	0,928	0,036	0,036
1414	10-1	47	IIIA	4,650	1,031	17,788	0,971	0,015	0,015
1414	10-1	48	IIIA	8,002	1,055	17,610	0,949	0,025	0,025
1414	10-1	49	IIIA	8,946	1,062	17,561	0,943	0,029	0,029
1414	10-1	50	IIIA	7,587	1,052	17,631	0,952	0,024	0,024
1414	10-1	51	IIIA	7,166	1,049	17,654	0,955	0,023	0,023
1414	10-1	52	IIIA	6,448	1,044	17,691	0,959	0,020	0,020
1414	10-1	53	IIIA	6,881	1,047	17,669	0,956	0,022	0,022
1414	10-2	56	IIIA	6,593	1,045	17,684	0,958	0,021	0,021
1414	10-2	57	IIIA	6,881	1,047	17,669	0,956	0,022	0,022
1414	4-3	61	IIIA	8,546	1,059	17,581	0,946	0,027	0,027
1443	7-3	71	IIIA	11,220	1,079	17,444	0,928	0,036	0,036
1268	1-6	89	IIIA	10,609	1,075	17,475	0,932	0,034	0,034
1268	1-4	91	IIIA	9,728	1,068	17,520	0,938	0,031	0,031
1418	3-3	24	IIIB	9,340	1,065	17,540	0,940	0,030	0,030
1418	3-3	25	IIIB	9,209	1,065	17,538	0,941	0,029	0,029
1414	10-1	54	IIIB	3,388	1,022	17,852	0,979	0,011	0,011
1443	7-2	67	IIIB	4,505	1,056	17,601	0,949	0,025	0,025
1443	7-2	69	IIIB	5,110	1,035	17,757	0,968	0,016	0,016
1268	1-6	88	IIIB	9,728	1,069	17,511	0,938	0,031	0,031
1268	1-4	90	IIIB	9,599	1,067	17,527	0,939	0,031	0,031

10.4.4 ANÁLISIS MICROTERMOMÉTRICO DE INCLUSIONES TIPO IV

Las inclusiones tipo IV son muy escasas en las muestras analizadas y solamente se llevaron a cabo rutinas de enfriamiento/calentamiento en tres inclusiones, por tratarse de inclusiones claramente de origen secundario y por ser poco comunes.

Tres cambios de fase fueron identificados: primera fusión del hielo (T_e), que varía entre -23.1 y -23.5°C , temperatura de fusión final del hielo (T_{mlce}), entre -4.1 y -7.7°C y temperatura de homogenización total (T_h), entre 131.5 y 179.2°C .

Las inclusiones medidas homogenizan mediante el encogimiento de la fase de vapor, sin embargo, a la temperatura máxima a la cual ocurre este cambio en los demás tipos de inclusiones encontradas, los cristales de minerales hijos permanecen intactos, por lo cual se decidió no seguir calentándolas.

Las temperaturas de primera fusión, por debajo del límite establecido para inclusiones sub saturadas en NaCl, pueden indicar en este caso particular, que dichas inclusiones de hecho se encuentran saturadas en este componente. De esta misma, calcular la salinidad a partir de los datos de temperatura de homogenización de las fases fluidas, produciría valores erróneos.

10.5 ESTIMACIÓN DE LA PRESIÓN DE ENTRAMPAMIENTO

La determinación de la presión de entrapamiento de una inclusión fluida y por inferencia de formación de un depósito mineral dado, se puede obtener mediante la construcción de isócoras (líneas de isodensidad) en términos de la densidad y la composición de los compuestos identificados. La estimación de la presión en depósitos minerales a partir de estos parámetros, representa siempre un valor mínimo.

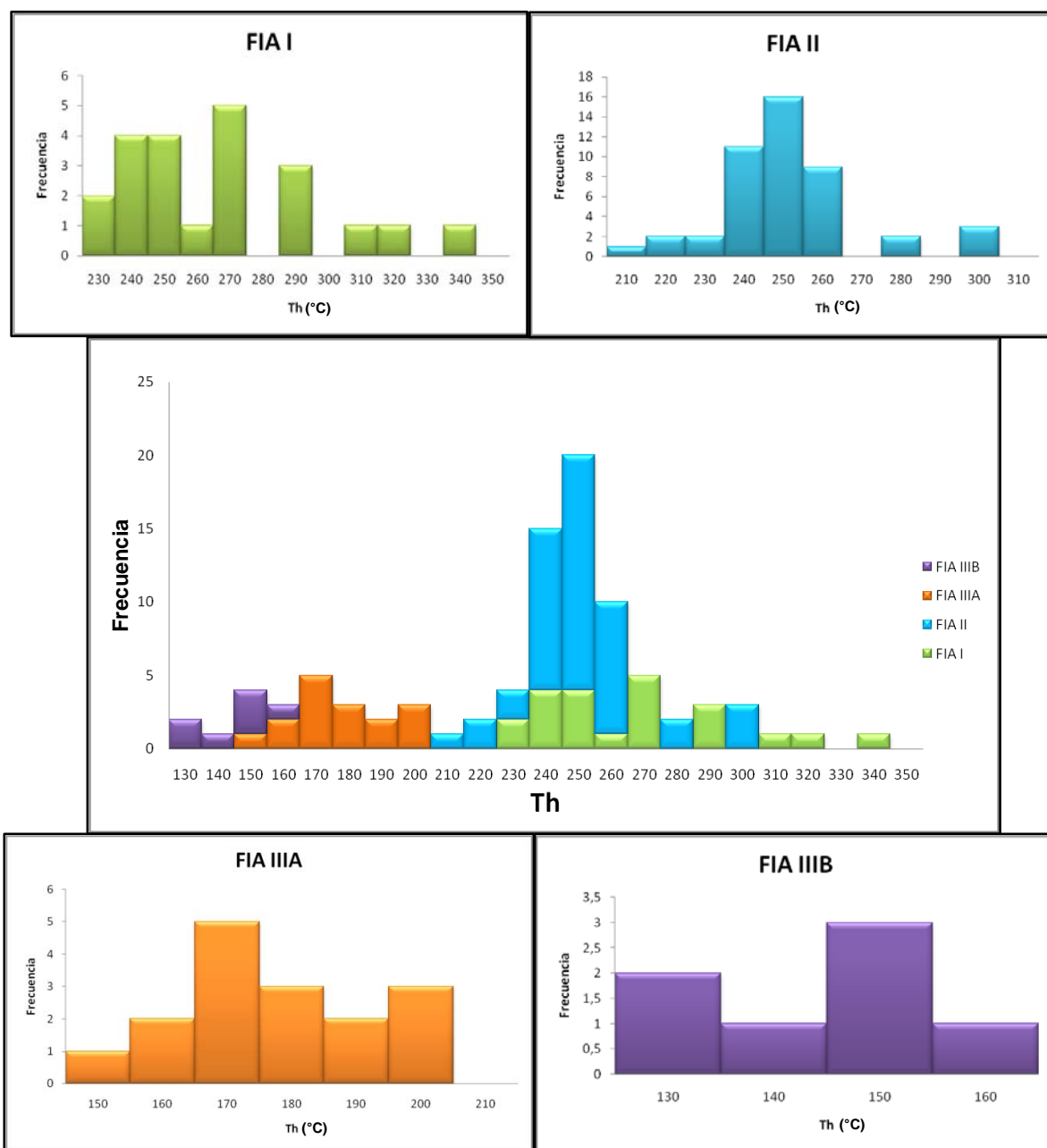


Figura 48. Histogramas de frecuencia para la temperatura de homogenización total (T_h) en los distintos tipos de inclusiones encontradas en El Vapor. Nótese como la temporalidad relativa de las inclusiones se relaciona claramente con sus temperaturas de homogenización.

En El Vapor, las isócoras construidas para las inclusiones tipo II, utilizando el programa ISOCHORE (Bakker, 1997; Bakker & Brown, 2003) indican un rango de presión entre 0,591 Kbar a 222°C y 2,996 Kbar a 307°C (**Figura 49**), correspondiente a una profundidad entre aproximadamente 2 y 10,9 Km., asumiendo una densidad promedio de la corteza continental en 2.78 Kg/m³.

La construcción de isócoras para las inclusiones tipo I, muestra una correlación negativa (pendiente negativa) entre la temperatura y la presión, lo que no tiene significado geológico, en especial cuando se tienen en cuenta las observaciones efectuadas, que indican claramente una coexistencia temporal de este tipo de inclusiones con las inclusiones tipo II.

Debido a la falta de otros geobarómetros en El Vapor, los resultados obtenidos no pueden ser verificados y por lo tanto, deben entenderse como la única fuente de información disponible hasta el momento acerca de la profundidad a la cual se pudo haber formado el depósito.

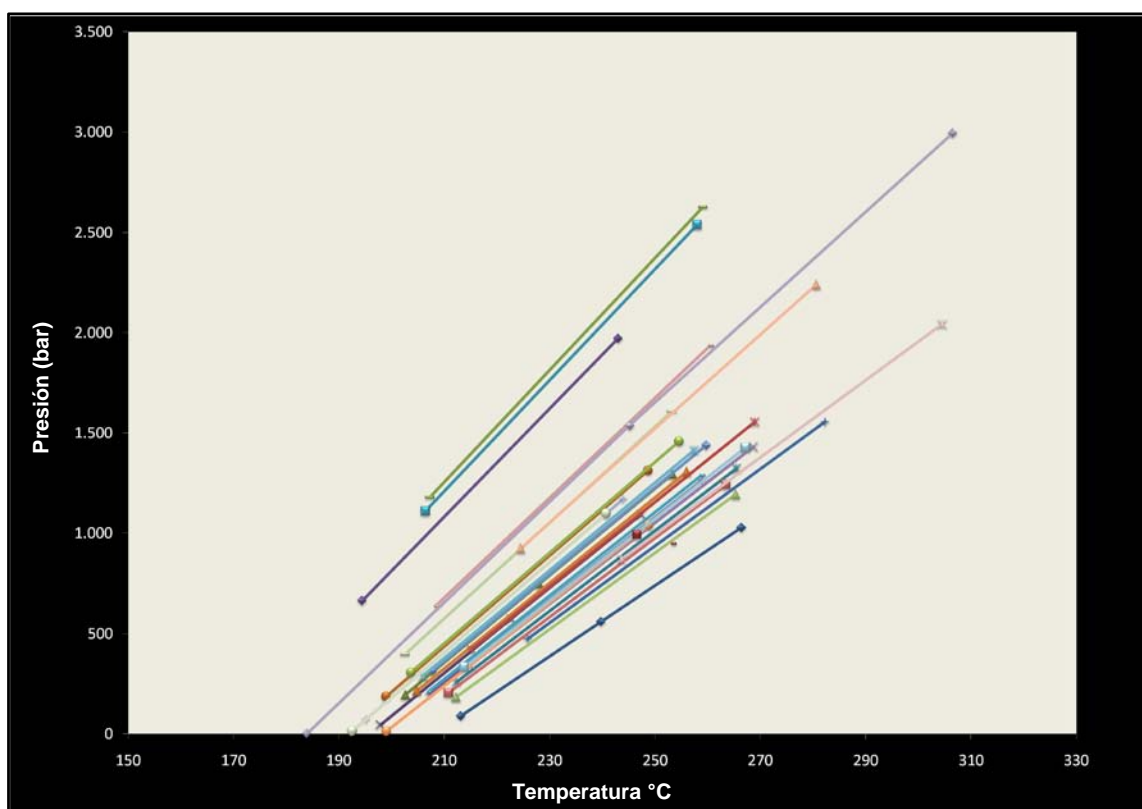


Figura 49. Isócoras calculadas mediante el programa ISOCHORE (Bakker, 1997; Bakker & Brown, 2003) para las inclusiones tipo II en El Vapor, representativas de la presión mínima de entrapamiento, variable entre 60 y 300MPa.

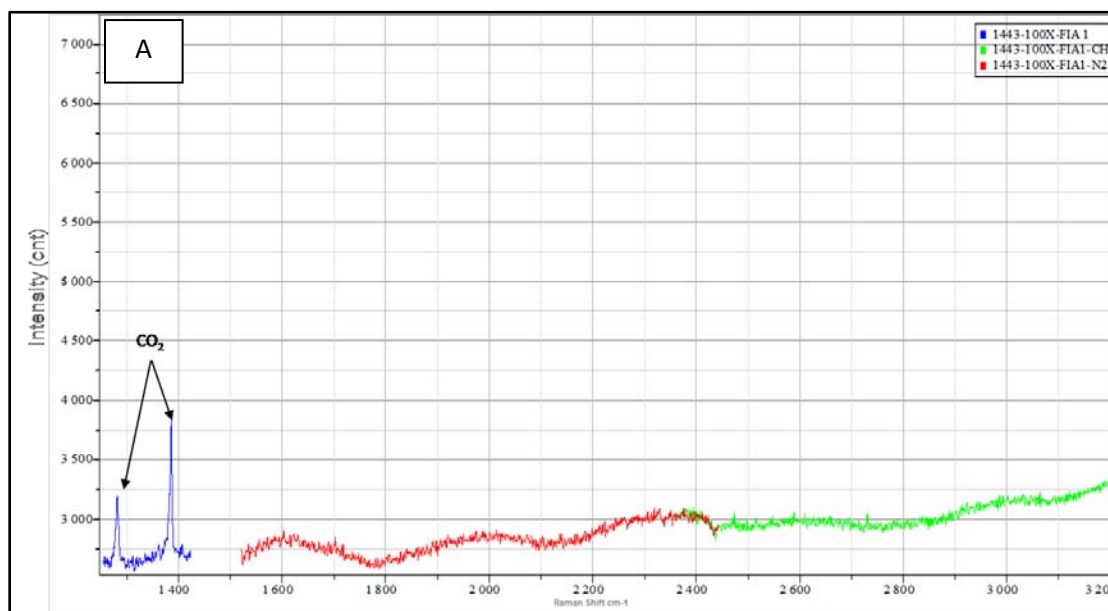
10.6 ESPECTROSCOPÍA RAMAN

En algunas inclusiones pertenecientes al tipo I se efectuaron mediciones espectroscópicas que confirman la presencia de CO₂ en la fase de vapor, responsable de la formación de hidratos de gas (clatratos) en las rutinas de enfriamiento (**Figura 50A**).

Mediciones espectroscópicas realizadas en inclusiones del tipo II, confirman la presencia de otros volátiles en la fase de vapor, además de CO₂ en los espectros obtenidos, siendo característica la presencia de los picos de N₂ y CH₄ (**Figura 50B y C**). El porcentaje de cada especie en los espectros, fue calculado con base en las áreas bajo los picos característicos de cada una (Burke, 2001), observándose una variación en el contenido de CO₂ entre 21 y 97%, de N₂ entre 3 y 65% y CH₄, desde ausente en algunas de las muestras, hasta un 14% en otras.

La variabilidad de los componentes de la fase de vapor en inclusiones del mismo tipo en una misma muestra, en particular en la relación CO₂/CH₄ es indicativa de un cambio en el estado de oxidación del fluido mineralizante producto de su reacción con las rocas caja.

Los espectros obtenidos se presentan en el **Anexo 4**.



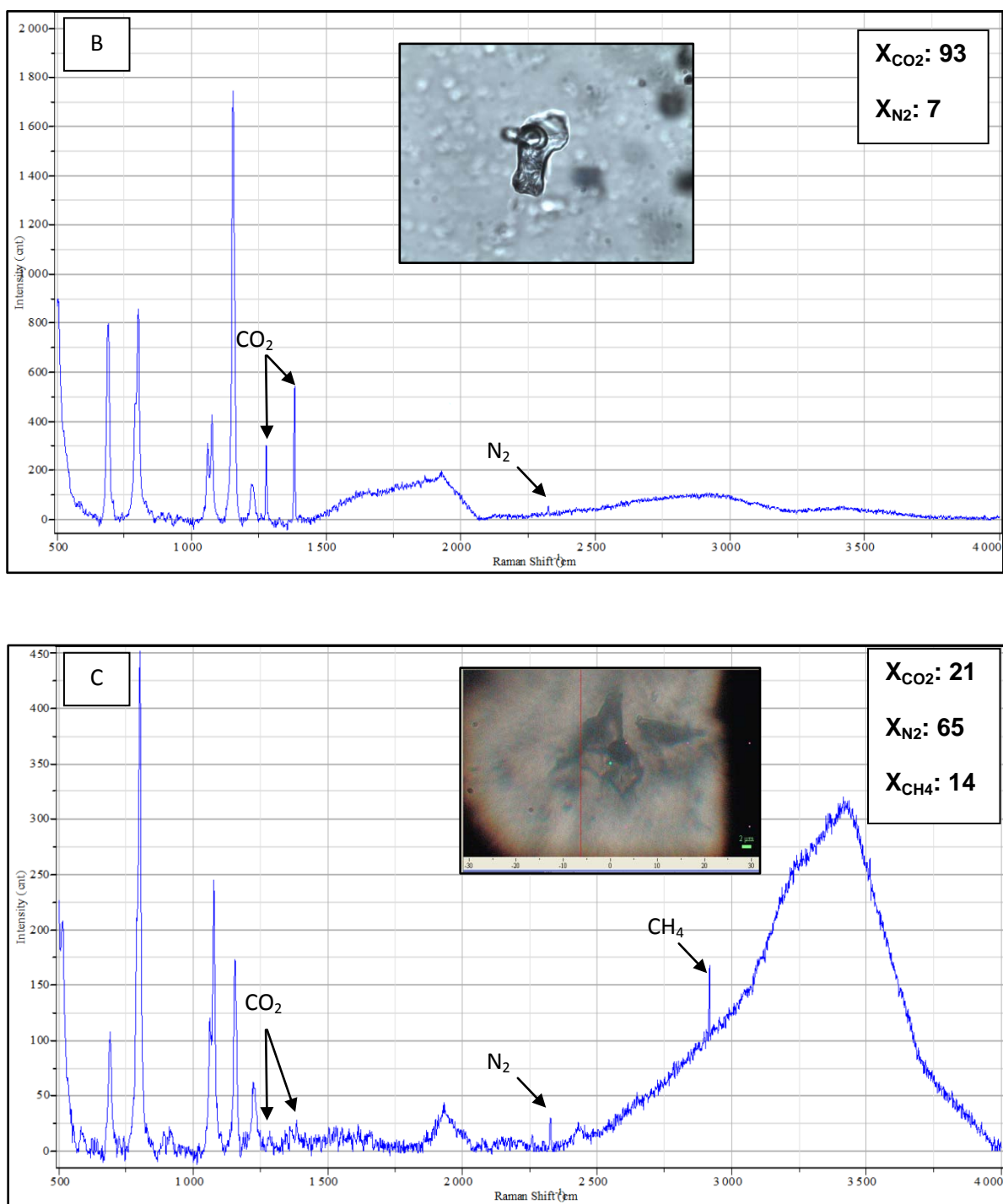


Figura 50. Espectros Raman de inclusiones tipo I y II de El Vapor, en los que se identifica la presencia de CO₂, N₂ y CH₄, que componen la fase de vapor. Es notoria la ausencia de CH₄ en algunas de las muestras analizadas, mientras que en otras alcanza hasta un 14%. A) sección 1443, B) sección 1418, C) sección 1428(b).

10.7 MECANISMOS DE ENTRAMPAMIENTO DE INCLUSIONES RICAS EN LÍQUIDO Y EN VAPOR: INMISCIBILIDAD VS MEZCLA DE FLUIDOS

La coexistencia de inclusiones fluidas acuosas y acuo-carbónicas paragenéticamente equivalentes en un depósito mineral, particularmente en una misma muestra, como ocurre en El Vapor, ha sido explicado mediante tres procesos principales (Zoheir *et al.*, 2008):

1. Separación de fases (inmiscibilidad), seguida de un proceso de entrampamiento de inclusiones ricas en componentes carbónicos ($\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4$) y ricas en líquido (ricas en agua) simultáneamente. Ramboz *et al.*, 1982 (en Diamond, 1990), proponen que para el reconocimiento de este proceso a partir de inclusiones fluidas en sistemas naturales, es necesario aplicar los siguientes criterios:

- Las inclusiones ricas en líquido y ricas en vapor deben estar íntimamente relacionadas en tiempo y espacio (deben pertenecer a una misma FIA).
- Debido a que las densidades entre los dos tipos de inclusiones son muy diferentes, el modo de homogenización de ellas debe ser distinto, unas a vapor y las otras a líquido.
- El volumen molar total de las inclusiones ricas en vapor y en líquido, debe ser compatible con la coexistencia en equilibrio de un único valor de temperatura de homogenización y por lo tanto, las inclusiones deben tener una presión interna de homogenización igual.
- La composición química relativa de los componentes en las inclusiones (ricas en vapor y en líquido) deben ser adecuados al fraccionamiento en las condiciones de presión y temperatura de entrampamiento.

2. Un proceso de deformación post entrapamiento ('stretching', "necking down") que produce pérdida parcial de agua, con el respectivo enriquecimiento de algunas inclusiones en volátiles (CO_2 , CH_4 , N_2 , etc.) y el entrapamiento de la fase acuosa en inclusiones ricas en líquido.

3. Mezcla de dos fluidos de fuentes diferentes, seguida del entrapamiento de inclusiones fluidas representativas de cada uno y/o entrapamiento de inclusiones distintas a diferentes tiempos.

En El Vapor, si bien es cierto que existe un proceso de modificación post entrapamiento de inclusiones debido a deformación frágil, preferencialmente en aquellas de mayor tamaño dentro del tipo II, la repercusión de este proceso en los datos obtenidos fue minimizado gracias a la cuidadosa selección de inclusiones, lo que fue respaldado por temperaturas de homogenización muy cercanas para inclusiones con relaciones de fase similares.

Adicionalmente, si bien es cierto que la mayoría de las inclusiones tipo II son primarias, en algunos casos representan una temporalidad un poco posterior (pseudosecundarias) con respecto a las inclusiones tipo I.

Por las razones anteriormente descritas, se descarta que la coexistencia de inclusiones del tipo I y II se deba a procesos de modificación post entrapamiento.

En términos prácticos, el reconocimiento de un proceso de inmiscibilidad o efervescencia en inclusiones fluidas, puede ser evaluado mediante la presencia de inclusiones contemporáneas ricas en líquido y en vapor (grado variable de relleno o ϕV), con temperaturas de homogenización y composiciones diferentes, que homogenizan de modo opuesto en un mismo rango de temperaturas.

Aunque en El Vapor es posible encontrar de manera localizada, inclusiones con un grado de relleno o proporción de fases a temperatura ambiente variable (entre 6/94 y 21/79 para el tipo I y entre 19/81 y 50/50 para el tipo II), con distintas densidades, la inexistencia de inclusiones que homogenicen a vapor, sugiere que

un proceso de inmiscibilidad entre dos líquidos no es completamente responsable de la formación de las inclusiones encontradas.

Por otra parte, la presencia de inclusiones coexistentes tipo I y tipo II, puede ser explicada de manera satisfactoria mediante un proceso de mezcla isotermal de fluidos, fundamentado en el hecho que las inclusiones bifásicas ricas en líquido (tipo I), primarias en todos los casos, presentan un rango de salinidad restringido (entre 4.1 y 4.9 wt % NaCl equiv), mientras que las inclusiones tipo II evidencian, en un rango de temperaturas mínimas de entrampamiento (T_h) similar, una variabilidad mucho mayor en la salinidad calculada (entre 3.5 y 9.2wt % NaCl equiv), que es en general, mayor en términos absolutos (**Figura 51**).

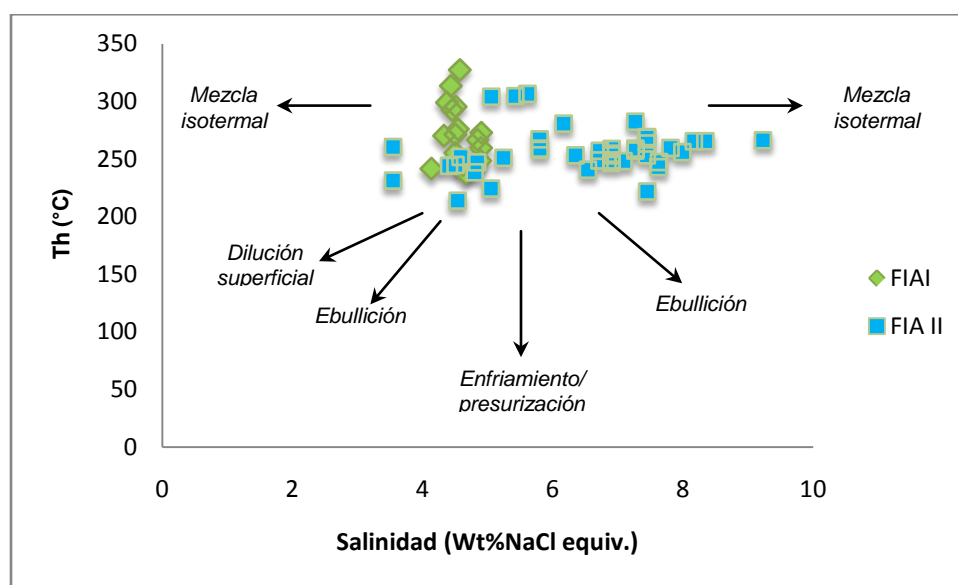


Figura 51. Diagrama T_h vs salinidad para las inclusiones tipo I y II de El Vapor, en el que se observa una tendencia de incremento de la salinidad para inclusiones tipo II en un rango de temperatura constante, mientras que para inclusiones tipo I, ésta se encuentra en valores mucho más restringidos para temperaturas similares. Esta tendencia se interpreta como el producto de un proceso de mezcla isotermal de fluidos, representados por los dos tipos de inclusiones descritos. Modificado de Wilkinson, 2001.

10.8 CONDICIONES DE pH Y ESTADO DE OXIDACIÓN DE LOS FLUIDOS MINERALIZANTES EN EL VAPOR

La estimación de las condiciones de acidez de un fluido hidrotermal ha sido un tema de importancia en el estudio de depósitos minerales y probablemente el mejor registro de esto en un fluido en particular, se refleja en los ensamblajes de los minerales de alteración, que en conjunto se desarrollan en condiciones determinadas.

En El Vapor, las asociaciones mineralógicas de alteración tanto carbonatación - propilítica (carbonato \pm epidota + clorita) como la ocurrencia común de moscovita \pm illita + cuarzo, indican un fluido cercano a la neutralidad con un rango de pH que varía entre 5 y 6 (Phillips & Groves, 1984 en Jia *et al.*, 2000).

La fugacidad de oxígeno (fO_2), una expresión del estado de oxidación de un fluido mineralizante, juega un papel muy importante en la capacidad de éste para transportar oro y es reflejo de las probables reacciones que haya tenido con las rocas encajantes de un depósito en particular.

En el caso de El Vapor, la presencia de cantidades variables de CO_2 , CH_4 y N_2 , identificada mediante el estudio microtermométrico y espectroscópico de inclusiones fluidas, refleja una composición relativamente reducida del fluido hidrotermal, que es concordante con la mineralogía de mena encontrada: una gran abundancia de pirita con respecto pirrotina y la ausencia de arsénico en el sistema, confirmada por la inexistencia de arsenopirita.

La presencia de CH_4 y N_2 en las inclusiones del tipo II y probablemente en el tipo I, así como la asociación observada de material carbonoso en las zonas mineralizadas, puede ser explicada por la reacción de los fluidos mineralizantes con las rocas caja (Johnson *et al.*, 1995; Cox *et al.*, 1991; 1995), en particular con los shales carbonosos de las Sedimentitas de Segovia a una temperatura entre 213 y 340 °C.

El rango de valores de fugacidad de oxígeno, calculado para un pH=5,5 (determinado por la asociación de minerales de alteración) a una presión de 300 MPa (comparable al valor máximo obtenido a la temperatura de entrapamiento), se encuentra entre 10^{-30} y 10^{-38} bar (**Figura 52**), considerando las temperaturas de homogenización total obtenidas a partir del análisis microtermométrico.

La gran variación en los valores de fugacidad de oxígeno obtenida indica que los fluidos mineralizantes en El Vapor probablemente tuvieron una historia compleja. Las diferencias en la relación CO_2/CH_4 , evidenciada en los datos espectroscópicos está relacionada a la presencia de fases más reducidas (con mayor abundancia de CH_4), producto de su reacción con las rocas caja.

10.9 MECANISMOS DE TRANSPORTE Y DEPÓSITO DEL ORO

Algunos autores han explorado los mecanismos de transporte en soluciones hidrotermales relativamente reducidas en equilibrio con pirita/pirrotina, que contienen tanto cloruros como sulfuros (Seward, 1973; Seward, 1984; Hayashi & Ohmoto, 1991), en un rango de temperatura entre 160 y 350°C y para un pH entre 1.4 y 9.5. Los resultados experimentales indican, que para condiciones de pH cercanas a la neutralidad en un rango de temperatura de 250 a 350°C, similares a los establecidos para El Vapor, el oro se moviliza principalmente como complejos bisulfurados ($\text{HAu}(\text{HS})_2^0$, $\text{Au}(\text{HS})_2^-$; $\text{AuHS}(\text{H}_2\text{S}_3)^0$), descartando la importancia de los complejos clorurados como un medio de transporte eficaz, a menos que el fluido sea pobre en H_2S , muy rico en cloruro y el pH sea menor a 4.5 (Hayashi & Ohmoto, 1991).

Debido a las condiciones de pH y fugacidad de oxígeno establecidas para El Vapor, así como la asociación frecuente de cristales de oro con sulfuros, el mecanismo más probable de transporte de oro es como $\text{AuHS}(\text{H}_2\text{S}_3)^0$, similar al establecido para otros depósitos parecidos, emplazados en secuencias sedimentarias (Jia *et al.*, 2000).

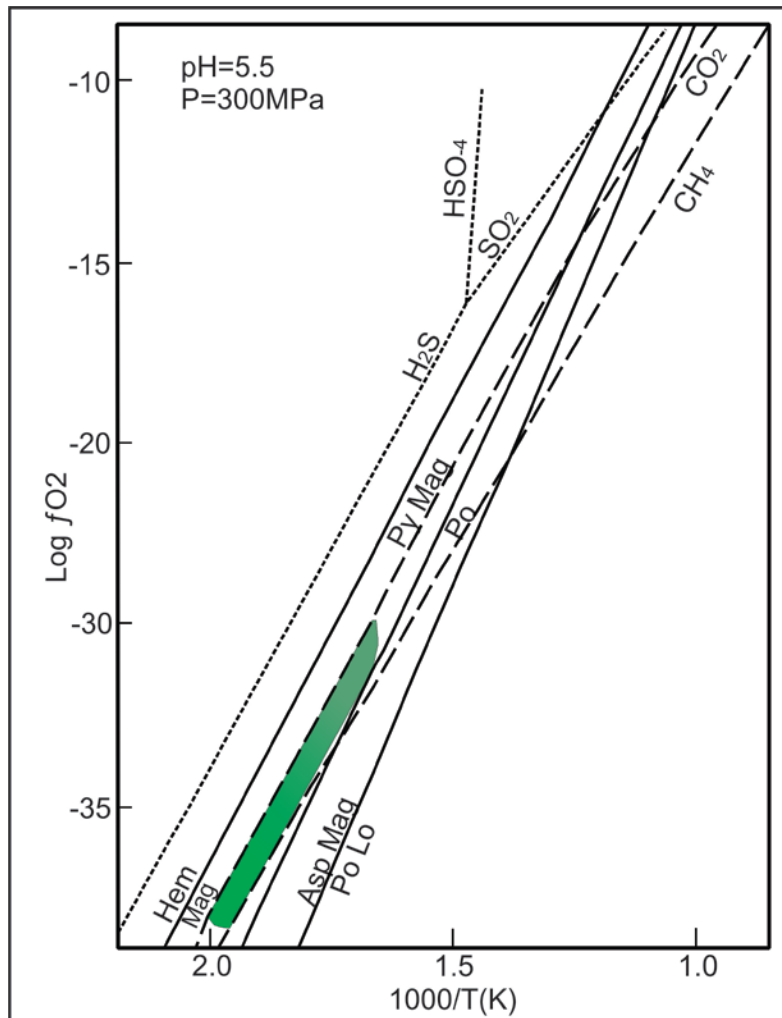


Figura 52. Diagrama de fugacidad de oxígeno vs temperatura para un pH=5.5 a 300 MPa (modificado de Jia et al., 2000) en el que se calculó el estado de oxidación de los fluidos hidrotermales de El Vapor a partir de las temperaturas de homogenización total, por debajo del buffer hematita-magnetita y entre CO₂-CH₄ (Py-Po), como lo indica la mineralogía presente y los resultados del estudio microtermométrico y espectroscópico.

Diversos mecanismos efectivos para producir la desestabilización de complejos bisulfurados y el depósito de oro han sido propuestos, entre los que se incluyen:

- Inmiscibilidad o separación de fluidos.
- Cambios en el pH (efectivos solamente en el caso que el oro se transporte como $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ según Hayashi & Ohmoto (1991)).

- Pérdida de H_2S (aq) en el fluido, que puede ser una consecuencia de la precipitación de sulfuros o de la mezcla del fluido hidrotermal con una solución pobre en este compuesto.
- Mezcla de fluidos de fuentes diferentes.
- Reducción del fluido por reacción con las rocas caja, en particular relacionada con el incremento en la actividad de hidrógeno (H_2 aq).

En El Vapor, debido a la inexistencia de evidencias que soporten una inmiscibilidad de fluidos, por lo menos de manera global en el depósito, se sugiere que este no es el principal proceso responsable del depósito de oro, aunque no se descarta por completo su participación.

Aunque en la zona de estudio las asociaciones minerales de alteración, indican un pH similar en todos los lugares observados, pequeñas variaciones en esta variable fisicoquímica se reflejan en la composición isotópica del azufre de los minerales de mena (Cap. 11), por lo que cambios de pH pudieron influir en cierto grado, en la desestabilización de los complejos bisulfurados y precipitación de los metales.

Si bien es cierto que hacia los respaldos de las zonas mineralizadas, en particular aquellas encajadas en las Sedimentitas de Segovia, se presenta piritización en algún grado de la roca caja, no existe una asociación clara del oro encontrado con esta generación de pirita de grano fino, por lo que un proceso de pérdida de H_2S probablemente juegue un papel minoritario en el depósito de oro.

Por otra parte, el análisis microtermométrico y espectroscópico de inclusiones fluidas, demostró que en El Vapor se presenta un proceso de mezcla de fluidos, representados por las inclusiones tipo I y II, en las que se reconoce además, relaciones CO_2/CH_4 variables, que indican estados de oxidación diferentes en las inclusiones tipo II, relacionadas a un proceso de reducción de los fluidos mineralizantes con las Sedimentitas de Segovia.

Estos dos últimos procesos son probablemente los principales mecanismos de depósito de oro a partir de las soluciones hidrotermales en la zona de estudio.

11. ANÁLISIS ISOTÓPICOS: FUENTE DE LOS FLUIDOS Y METALES EN EL VAPOR

11.1 INTRODUCCIÓN

El análisis isotópico de un depósito mineral, en particular aquel enfocado en conocer determinar la fuente de los metales, características de los fluidos mineralizantes y establecer su relación genética con una “suite” de rocas, dentro de las cuales generalmente se incluyen las rocas caja, es una herramienta de análisis de vital importancia en su conocimiento. Los resultados de un estudio isotópico tienen además, implicaciones en la prospección y exploración para determinados tipos de depósitos en un área particular.

Este capítulo presenta los resultados de análisis de isótopos estables (S, O, D) y radiogénicos (Pb-Pb) efectuados en las mineralizaciones de El Vapor, cuya interpretación en conjunto, revela pistas acerca de las características de los fluidos hidrotermales y de la fuente de los metales.

11.2 METODOLOGÍA

Un total de veinte (20) muestras de sulfuros, pirita, esfalerita y galena en paragénesis, fueron escogidas para la realización de análisis isotópicos de azufre (**Figura 53**). Las muestras son representativas de los eventos mineralizantes determinados petrográficamente. Cada una fue triturada y tamizada, escogiéndose la fracción granulométrica entre 60 y 120 mesh (125 y 250 μm) para análisis. Bajo microscopio binocular, fueron seleccionados cristales individuales de cada mineral, limpios e inalterados hasta obtener en promedio de 15 mg.

A cada muestra fue adicionado 1mg de pentóxido de Vanadio, que actúa como un catalizador. Las muestras fueron vaporizadas y analizadas en un espectrómetro

de masas “Thermoquest-Finnigan Delta Plus XL” en las instalaciones del Servicio Geológico de los Estados Unidos en Denver, Colorado, los resultados se presentan referidos al estándar de la Troilita del Cañón del Diablo (DCT).

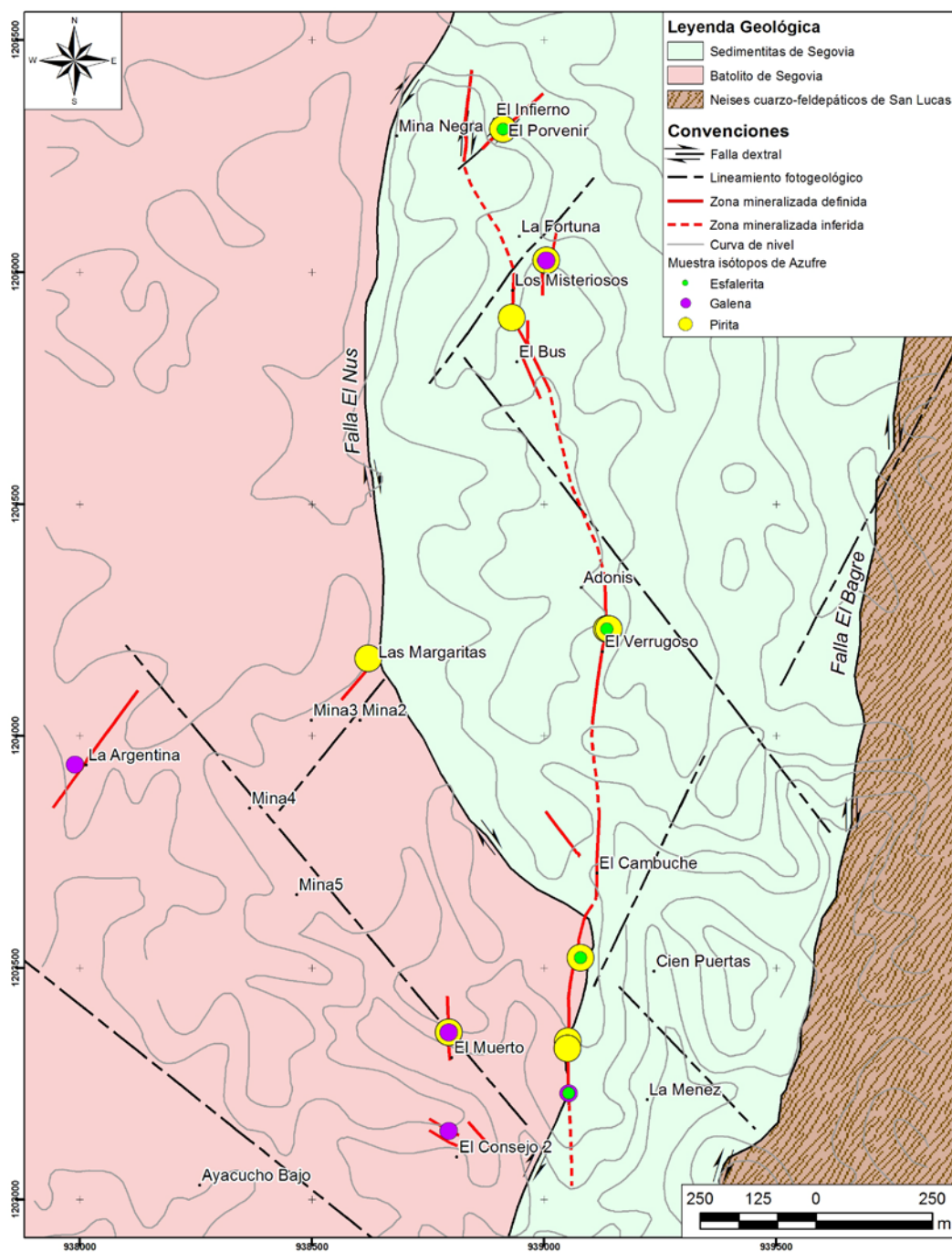


Figura 53. Distribución de muestras utilizadas para análisis de isótopos de azufre en El Vapor.

Un total de tres (3) muestras de sericita (moscovita) de alteración hidrotermal y tres (3) de cuarzo masivo (segundo evento de mineralización) fueron escogidas para la determinación de relaciones isotópicas de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y D/H.

En el caso de las muestras de sericita se efectuó su separación de las demás fases minerales utilizando un procedimiento que incluyó el lavado de la muestra con agua desionizada, separación magnética utilizando un separador Frantz y la utilización de líquidos densos, finalizando con concentración manual en microscopio binocular. En el caso de los cristales de cuarzo, se escogieron directamente bajo observación en lupa binocular, siendo triturados y tamizados entre 60 y 120 mesh.

Los análisis de isótopos estables fueron realizados en la Universidad de Salamanca. En el caso del oxígeno se efectuó la obtención de CO_2 mediante fluorinación láser, mientras que en el caso del deuterio se obtuvo H_2 a partir de la reducción de H_2O obtenido por fusión de las muestras en un horno de radiofrecuencia. Las determinaciones isotópicas fueron realizadas en un espectrómetro de fuente gaseosa SIRA-II en modo "DualInlet". Los resultados se presentan estandarizados con respecto al SMOW.

Finalmente, dos (2) muestras de shales negros de las Sedimentitas de Segovia, una (1) de feldespato del Batolito de Segovia, dos (2) de cuarzo, tres (3) de galena y seis (6) de piritita (tanto de piritita finogranular como de grano grueso) fueron analizadas en el Instituto de Geocronología de la Universidade de São Paulo, Brasil, para la determinación de las razones isotópicas de $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.

Las muestras escogidas fueron trituradas y tamizadas, escogiéndose la fracción entre 60 y 120 mesh en el caso de los silicatos y sulfuros, mientras que en roca total se escogió la fracción menor a 250 μm . Un gramo de muestra fue separado en microscopio binocular, en el caso de minerales, mientras que 50 gramos fueron analizados en el caso de roca total.

En el laboratorio de análisis las muestras fueron atacadas químicamente y se efectuaron columnas de separación de plomo, excepto en el caso de los cristales de galena. Las razones isotópicas fueron determinadas en un espectrómetro de masas de ionización termal “Thermo Finnigan Triton”. A cada muestra se introdujo una cantidad de “spike” de composición isotópica conocida y en cada set de muestras se analizaron blancos de laboratorio.

11.3 ISÓTOPOS DE AZUFRE

11.3.1 COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE SULFUROS

En términos generales, la cantidad de un isótopo estable que se incorpora en una fase mineral determinada, es decir el fraccionamiento isotópico entre dicho mineral y el fluido a partir del cual éste se formó, es fuertemente dependiente de los parámetros fisicoquímicos de dicho fluido así como de la concentración original de dicho isótopo, son especialmente importantes la fugacidad de oxígeno, azufre, pH y temperatura (Ohmoto, 1972; Taylor, 1974), por lo que el cálculo de dicho fraccionamiento permite conocer los demás parámetros y permite una aproximación a las condiciones fisicoquímicas de los fluidos hidrotermales.

Análisis isotópicos en cristales de pirita asignados al evento premineral (pirita de grano fino), muestran una variación en la concentración de ^{34}S entre -0.3 y +1.1‰.

Por su parte, los valores de $\delta^{34}\text{S}$ de pirita del primer evento de mineralización varían entre +1.1 y +5.1‰, en galena entre -1.4 y -0.5‰ y en esfalerita el único valor del que se dispone es de +4.1‰. Unas pocas muestras de esfalerita asignadas al evento dos de mineralización, presentan valores entre +0.2 y +3.28‰ y mientras que una única muestra de galena presenta un valor de -1.4‰. La composición isotópica del azufre en distintas fases minerales de El Vapor se resume en la **Tabla 8** y en la **Figura 54**.

Tabla 8. Resumen de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos en sulfuros de los diferentes eventos de mineralización identificados en El Vapor.				
Muestra	Unidad encajante	Evento mineralización	Mineral	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$
1401	Batolito de Segovia	1	Gn	-1,3
1406	Batolito de Segovia	Preminal	Py	-0,3
1412	Batolito de Segovia	?	Gn	-1,2
1428	Batolito de Segovia	1	Sp	0,3
1428	Batolito de Segovia	Preminal	Py	0,9
1443	Batolito de Segovia	Preminal	Py	1,1
1266	Batolito de Segovia	2	Gn	-1,4
1266	Batolito de Segovia	Preminal	Py	0,6
1415	Sedimentitas de Segovia	1	Py	1,0
1418	Sedimentitas de Segovia	1	Py	1,1
1438	Sedimentitas de Segovia	1	Py	2,1
1438	Sedimentitas de Segovia	2	Sp	3,3
1442	Sedimentitas de Segovia	1	Py	1,4
1252	Sedimentitas de Segovia	1	Py	3,1
1267	Sedimentitas de Segovia	2	Gn	-1,4
1267	Sedimentitas de Segovia	2	Sp	0,2
1268	Sedimentitas de Segovia	1	Gn	-0,5
1268	Sedimentitas de Segovia	1	Py	2,6
1269	Sedimentitas de Segovia	1	Sp	4,1
1269	Sedimentitas de Segovia	1	Py	5,1

A las condiciones de fugacidad de oxígeno (10^{-30} a 10^{-38}), pH (5-6) y temperatura (250-300°C) establecidas para los fluidos mineralizantes para El Vapor, la composición isotópica de azufre puede ser descrita en términos de $\delta\text{S}^{34}_{\text{H}_2\text{S}}$, pues es la especie dominante en el fluido (Ohmoto, 1972; Rye & Ohmoto, 1974).

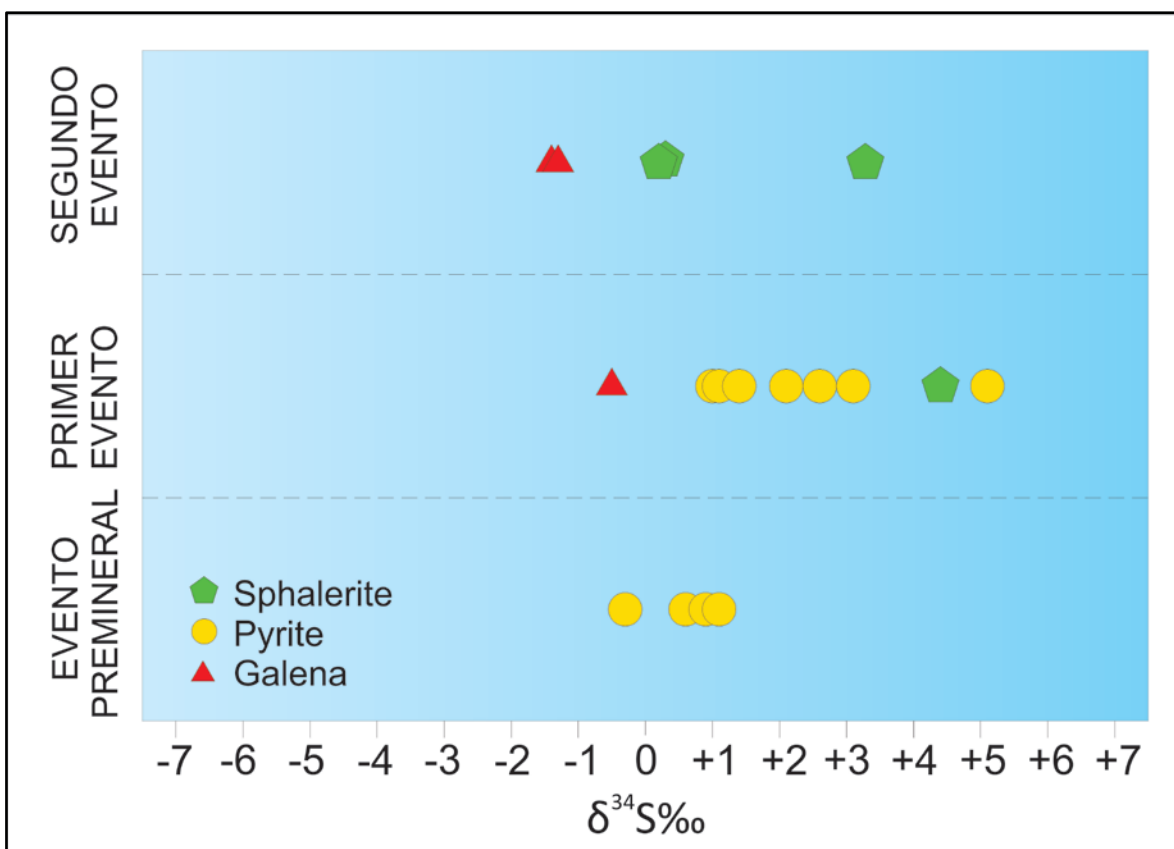


Figura 54. Composición isotópica de δS^{34} en sulfuros de los diferentes eventos de mineralización identificados en El Vapor.

Utilizando los factores de enriquecimiento isotópico entre especies sulfurosas y $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$, propuestos para esfalerita, piritita y galena por Sakai (1968), Kajiwara & Krouse (1971) y Czamanske (1969) (extraídos de Ohmoto, 1972), la composición isotópica del fluido mineralizante fue calculada entre +1.3 y +5.5‰ para el primer evento mineralizante y entre +1.6 y +4.7‰ para el segundo.

La distribución de los valores isotópicos de azufre en los sulfuros de El Vapor y en el fluido, muestra una variación temporal y espacial (**Figura 55**), en la que los valores en cada especie mineral analizada se incrementan (se vuelven más positivos) desde el primer hacia el segundo evento de depósito y desde el suroccidente hacia el nororiente de la zona de estudio.

Cualquier discusión acerca del significado de variaciones de composición isotópica de sulfuros en un depósito dado puede referirse a las condiciones de estabilidad

de los minerales en dicho depósito, de manera que permita efectuar una evaluación integrada (Ohmoto, 1972). En las condiciones fisicoquímicas (fO_2 , pH y temperatura) establecidas para las mineralizaciones de El Vapor, la mayoría de las muestras se encuentran dentro del campo de estabilidad de la pirita, por debajo de la línea de coexistencia con magnetita y probablemente entrando hacia el campo de pirrotina, mientras que otras se encuentran en el campo del grafito, lo que es concordante con la mineralogía de mena encontrada y con la coexistencia de material grafitoso con los minerales de mena.

En condiciones reductoras a pH moderado, la composición isotópica de los sulfuros presentes puede ser muy cercana a la composición del fluido hidrotermal a partir del cual precipitaron y éstos pueden ser prácticamente insensibles a cambios en éste o la fugacidad de oxígeno del fluido (Ohmoto, 1972; Rye & Ohmoto, 1974). Pese a lo anterior, las variaciones de $\delta^{34}S$ observadas entre sulfuros de distintos eventos de mineralización, pero sobre todo entre sulfuros obtenidos de zonas mineralizadas a lado y lado de la falla El Nús, implican que existieron cambios en las condiciones fisicoquímicas del fluido.

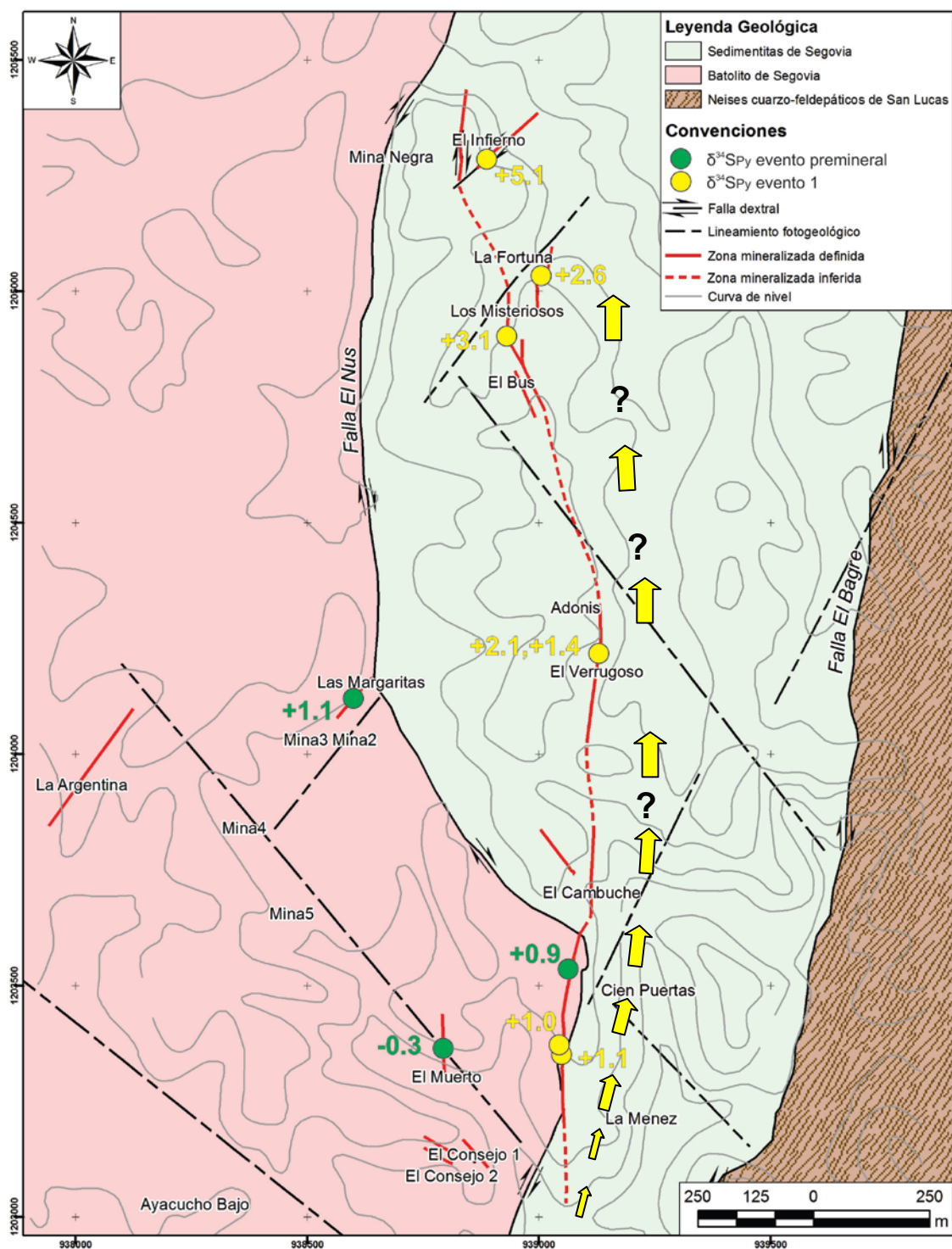


Figura 55. Mapa de distribución espacial y temporal de la composición isotópica de $\delta^{34}\text{S}$ para pirita. Nótese como los valores se incrementan hacia el noreste, lo que puede sugerir un patrón de paleoflujo.

Habiéndose establecido en primera medida, que las temperaturas de homogenización del primer evento mineralizante no cambian de forma significativa a lo largo del rumbo del tren principal de mineralización, los parámetros factibles de cambio que pueden reflejar las variaciones observadas son el estado de oxidación del fluido mineralizante, desde un estado un poco más oxidante hacia uno un poco más reductor y el pH, desde prácticamente neutro (5-6) hasta ligeramente alcalino (**Figura 56**). Lo anterior concuerda con las variaciones observadas en la razón CO_2/CH_4 en el análisis espectroscópico de las inclusiones fluidas tipo II, que representan diferentes grados de reacción del fluido mineralizante con las rocas caja, en particular con las Sedimentitas de Segovia.

La tendencia espacial al incremento en los valores de las razones isotópicas del azufre (valores progresivamente más positivos) desde el suroccidente hacia el nororiente, para el primer evento de mineralización, puede ser explicado mediante un mayor grado de reacción del fluido mineralizante con los shales de las Sedimentitas de Segovia, lo que a su vez, plantea el interrogante de si dichas variaciones pueden representar un vector de dirección de paleoflujo que apunta hacia el suroccidente como la zona desde la cual pudieron provenir los fluidos hidrotermales (**Figura 55**).

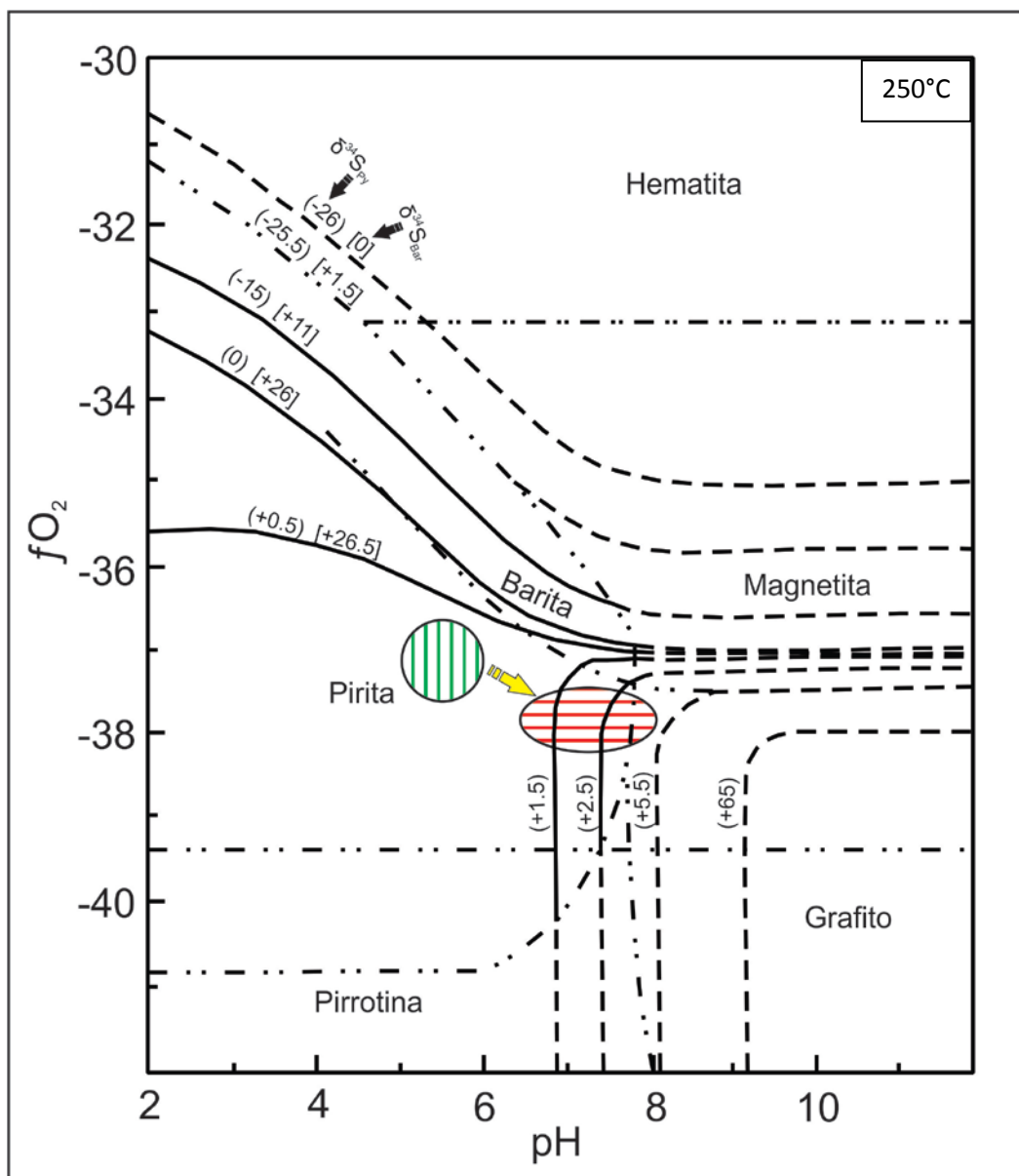


Figura 56. Diagrama de fugacidad de oxígeno vs pH calculado a 250°C, que muestra la variación en la composición isotópica de $\delta^{34}\text{S}$ de cristales de pirita desde el suroccidente (campo de color verde) hacia el nororiente (campo rojo) y que se interpreta como el resultado de pequeñas variaciones en el estado de oxidación y el pH del fluido mineralizante, producto de su reacción con shales carbonosos de las Sedimentitas de Segovia. $\delta^{34}\text{S}=0\text{‰}$, fuerza iónica =1 y $mK\pm=0.1$ m. Los campos de estabilidad de los minerales están representados a $\Sigma\text{S}=0.01$ y $f_{\text{CO}_2} = 1$ atm. Modificado de Greig *et al.*, 1971 (en Rye & Ohmoto, 1974).

11.3.2 GEOTHERMOMETRIA

El factor de fraccionamiento isotópico entre dos fases minerales formadas a partir de un mismo fluido hidrotermal, está principalmente condicionado por la temperatura, gracias a lo cual, un par de minerales contemporáneos, formados en condiciones de equilibrio isotópico, puede utilizarse para calcular la temperatura de fraccionamiento isotópico a la cual se formaron y aún mejor, puede ser utilizado para evaluar la existencia o no de condiciones de equilibrio en un depósito determinado (Ohmoto, 1972; Rye & Ohmoto, 1974).

La mayor dificultad en la utilización de pares minerales para el cálculo de temperaturas de fraccionamiento isotópico se encuentra en garantizar que dichos minerales realmente se formaron al mismo tiempo y que efectivamente corresponden al mismo evento mineralizante.

En el caso de El Vapor, las temperaturas de fraccionamiento isotópico calculadas, para pares minerales Py-Sp, Py-Gn y Sp-Gn utilizando los factores de fraccionamiento propuestos por Kajiwara & Krouse (1971) y por Kiyosu (1973), muestran valores que varían entre 275.8 y 322.8°C (Py-Gn y Py-Sp) para el primer evento de mineralización y 367.8°C (Sp-Gn) para el segundo evento. Los resultados del cálculo de temperaturas isotópicas se resumen en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Temperaturas de fraccionamiento isotópico calculadas para pares de sulfuros en los tres eventos de mineralización de El Vapor.

Muestra	Evento	Par mineral	Temperatura de fraccionamiento isotópico
1269	1	Py-Sp	275.8°C
1268	1	Py-Gn	322.8°C
1267	2	Sp-Gn	367.8°C

Evaluar las temperaturas de fraccionamiento isotópico obtenidas en El Vapor, solamente se puede efectuar en el caso del primer evento de mineralización, pues es el único del cual se cuenta con datos de homogenización total obtenida a partir del análisis de inclusiones fluidas (tipo I y II). A la luz de los datos

microtermométricos, las temperaturas de fraccionamiento isotópico obtenidas son concordantes e implican que se alcanzaron las condiciones de equilibrio isotópico para el sistema.

11.3.3 FUENTE DEL AZUFRE

Evaluar la fuente del azufre en un determinado depósito requiere el conocimiento de las características fisicoquímicas del fluido para determinar a qué se debe una composición isotópica particular. Tradicionalmente se ha interpretado que valores isotópicos poco variables cercanos a cero indican una signatura isotópica de azufre típica de una fuente magmática, mientras que por el contrario, un empobrecimiento fuerte en los valores de $\delta^{34}\text{S}$ indica un proceso de reducción del azufre por la acción de microorganismos. Pese a lo anterior, ha sido demostrado que la composición isotópica de azufre en una fase mineral depende de las condiciones fisicoquímicas que sufrió el fluido hidrotermal a partir del cual precipita y por lo tanto, sulfuros con composiciones isotópicas cercanas a cero no necesariamente evidencian una fuente magmática (Ohmoto, 1972).

En El Vapor, todas las muestras analizadas presentan variaciones relativamente pequeñas con valores cercanos a cero, pese ello, determinar la fuente del azufre presente en el depósito no es posible, pues no se cuenta con datos acerca de la composición isotópica de las rocas encajantes lejos de la mineralización, indispensables para efectuar una comparación entre los valores obtenidos.

No obstante lo anterior, las variaciones relativamente pequeñas encontradas en los datos obtenidos, sugieren por lo menos, que probablemente haya existido una única fuente relativamente uniforme del azufre.

11.4 ISÓTOPOS DE OXÍGENO Y DEUTERIO

Análisis de isótopos de oxígeno y deuterio en muestras de moscovita y cuarzo a lo largo del tren principal de mineralización en El Vapor, fueron efectuados con el fin de identificar la composición isotópica del fluido hidrotermal en equilibrio con dichas fases minerales y realizar una aproximación a su probable origen. Los valores de oxígeno y deuterio se presentan en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Resultados analíticos de isótopos estables en las mineralización de El Vapor.						
Muestra	Mineral	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}\text{‰}$	%H ₂ O	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}\text{‰}$ (H ₂ O)	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}\text{‰}$ (H ₂ O)
1263	Moscovita	11.8	-63.9	3.1	10.33	-17.70
1402	Moscovita	11.7	-67.1	2.1	10.23	-21.06
1406	Cuarzo	13.7	-72.9	0.1	6.61	----
1419	Cuarzo	15.2	-94.5	9.3	8.09	----
1428	Moscovita	13.6	-66.9	1.1	12.13	-20.85
1428	Cuarzo	14.9	-51.2	0.4	7.8	----

Los valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ en moscovita varían entre +11.7 y +13.6‰, mientras que en cuarzo se encuentran entre +13.7 y +14.9‰. Por su parte, la composición de $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$, en moscovita se encuentra entre -63.9 y -67.1‰ y entre -51.2 y -94.5‰ en inclusiones fluidas en cristales de cuarzo.

En general, los datos de isótopos de oxígeno y deuterio muestran poca variabilidad entre sí, con excepción de los resultados de δD obtenidos a partir de inclusiones fluidas, que muestran una composición isotópica mucho más ligera (valores más negativos) y diferente entre muestras de cuarzo obtenidas en el Batolito de Segovia y las Sedimentitas de Segovia. Valores de δD muy ligeros han sido relacionados a la presencia de CH₄, producto de la reacción de los fluidos hidrotermales con rocas ricas en materia carbonosa (Rye & Rye, 1974), proceso que de hecho se identifica en El Vapor. Adicionalmente, la variabilidad reconocida en los valores de deuterio en muestras de cuarzo da cuenta del hecho

que probablemente fueron analizadas inclusiones secundarias que no representan el fluido hidrotermal.

La composición isotópica del fluido hidrotermal en equilibrio con moscovita y cuarzo, en términos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD , indispensable para efectuar cualquier análisis acerca de su origen, fue calculada a 300 C utilizando los coeficientes de fraccionamiento propuestos por Zheng (1993) y Suzuoki & Epstein (1976) respectivamente. Los resultados de los cálculos efectuados se muestran en la **Tabla 10** e indican que el fluido hidrotermal en equilibrio con moscovita y cuarzo, presenta valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre 10.23 y 12.13‰ y entre 6.61 y 8.09‰ respectivamente. Por su parte, los valores de δD para el fluido, varían entre -17.7 y -21.06‰ en equilibrio con moscovita.

11.4.1 TIPO DE FLUIDO MINERALIZANTE EN EL VAPOR

Tal vez la principal aplicación de los isótopos de oxígeno y deuterio en el campo de los yacimientos minerales, se encuentre en el hecho que pueden ser utilizados como trazadores geoquímicos del origen del agua de los fluidos hidrotermales, pues distintas fuentes de ésta en la corteza presentan firmas isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ y/o δD características (Taylor, 1974). Cualquier discusión acerca del origen de los fluidos mineralizantes basada en la composición isotópica en términos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD , debe efectuarse teniendo en cuenta los valores obtenidos para dicho fluido en equilibrio con fases minerales formadas a partir del mismo.

En El Vapor, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD para el fluido hidrotermal a partir de moscovita, evidencian que los fluidos hidrotermales son coherentes con la composición isotópica del agua de origen metamórfico (**Figura 57**), a pesar de lo cual la composición isotópica ~~de~~ δD del fluido a partir inclusiones fluidas en cuarzo, muestran valores muy dispares más ligeros, que en algunos casos han sido interpretados como consecuencia de la abundancia de CH_4 en dichas inclusiones ya que el fraccionamiento entre éste y el H_2O es menor a temperatura

ambiente que a la de entrapamiento (Rye & Rye, 1974). Adicionalmente, no se descarta que se hayan analizado inclusiones secundarias, que no representan la composición real del fluido.

Aunque no se dispone de datos acerca de la composición isotópica del agua meteórica para la zona de El Vapor, los valores obtenidos, en especial a partir del análisis de moscovita hidrotermal, descartan la participación de ésta en la generación de dichas mineralizaciones.

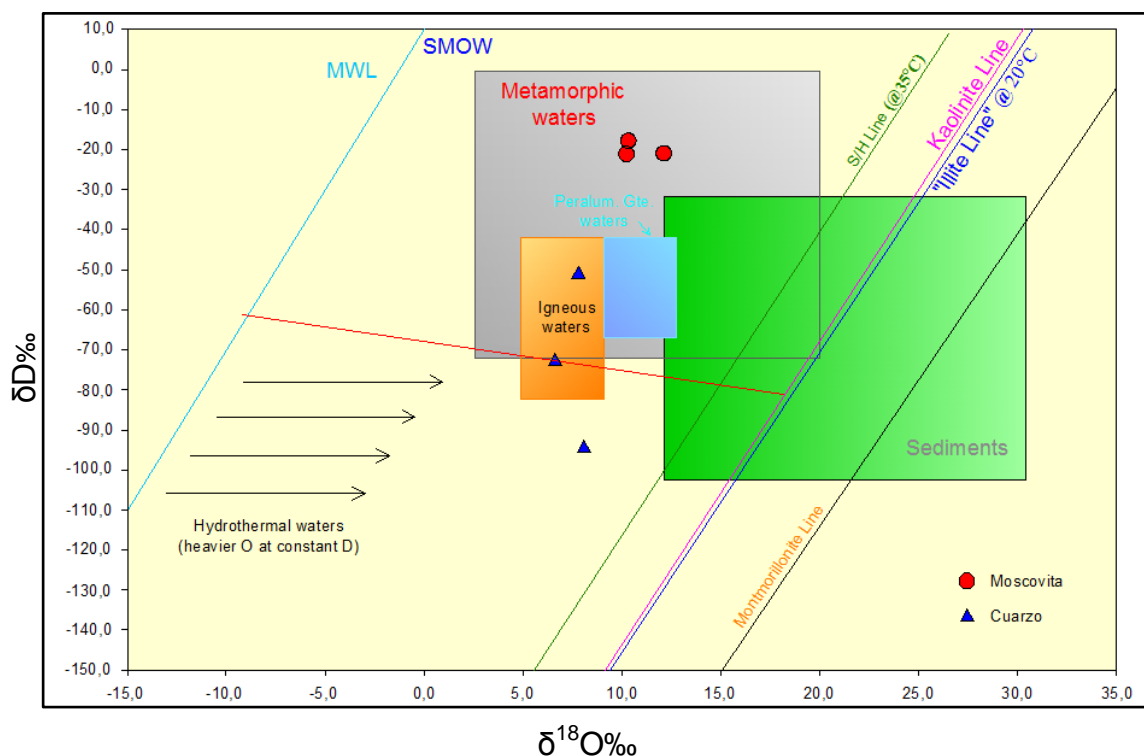


Figura 57. Diagrama de composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y δD para el fluido hidrotermal en El Vapor, calculadas a 300°C en equilibrio con moscovita y cuarzo. Modificado de Sheppard, 1986.

11.5 ISÓTOPOS DE PLOMO

La aplicación de isótopos de plomo en el entendimiento de la génesis y fuente de los metales (por inferencia a partir del plomo) e interacción de los fluidos hidrotermales con las rocas caja, así como en determinar la extensión de patrones

de circulación, ha sido de vital importancia en el estudio de depósitos minerales y es una herramienta aplicable a la exploración mineral. La composición isotópica de plomo en sulfuros por su parte, aporta información geocronológica, relativa o absoluta, acerca de eventos de depósito (Faure, 1977; Tosdal *et al.*, 1999).

Debido a que la concentración de U en sulfuros es relativamente insignificante con respecto a la cantidad de plomo incorporado en éstos, las razones isotópicas medidas en ellos reflejan de manera muy aproximada la composición del plomo del fluido hidrotermal y de los minerales al momento de su cristalización, en particular para depósitos jóvenes.

En El Vapor, las razones isotópicas de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de piritita tanto gruesa como finogranular varían entre 18.613-18.690, 15.596-15.653 y 38.432-38.648 respectivamente, mientras en muestras de galena presentan una variación entre 18.528-18.673, 15.596-15.629 y 38.432-38.573. Por su parte, cristales de cuarzo hidrotermal presentan razones $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ que se encuentran entre 18.686-18.694, 15.619-15.652 y 38.537-38.648 respectivamente.

Shales carbonosos de las Sedimentitas de Segovia presentan razones isotópicas $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ variables entre 18.787-19.108, 15.593-15.652 y 38.596-38.923. Una muestra de feldespato plagioclasa extraída del Batolito de Segovia, presenta valores de 18.604, 15.605 y 38.401. Los resultados analíticos de isótopos de plomo se resumen en la **Tabla 11**.

La composición isotópica de plomo en los sulfuros y cuarzo de las mineralizaciones y del feldespato extraído del Batolito de Segovia, indica que éstos presentan valores radiogénicos, que son típicos de una fuente cortical. Adicionalmente, los resultados muestran una composición isotópica $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ más radiogénica para las muestras de los shales carbonosos de las Sedimentitas de Segovia, que es concordante con un mayor contenido de U y Th, típico de rocas sedimentarias producto de la sedimentación de materiales corticales, en las que además, a diferencia de minerales que no incorporan U o Th

en su estructura (como galena), existe una mayor cantidad de plomo producto del decaimiento radioactivo.

Tabla 11. Razones isotópicas de Pb para muestras de roca total, sulfuros y silicatos de El Vapor

Muestra	Material	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Error % patrón	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Error % patrón	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Error % patrón
1432	Shale negro	19,108	0,029	15,652	0,029	38,923	0,031
1433	Shale negro	18,787	0,026	15,593	0,028	38,596	0,029
1401	Galena	18,673	0,006	15,629	0,008	38,573	0,009
1267	Galena	18,644	0,004	15,603	0,004	38,482	0,004
1268	Galena	18,528	0,004	15,596	0,005	38,432	0,006
1428	Cuarzo	18,686	0,006	15,652	0,008	38,648	0,010
1419	Cuarzo	18,694	0,014	15,618	0,013	38,537	0,015
1405	Feldespató	18,604	0,006	15,605	0,006	38,401	0,006
1428	Pirita fina	18,613	0,030	15,624	0,030	38,554	0,033
1428	Pirita gruesa	18,671	0,006	15,637	0,006	38,598	0,006
1419	Pirita fina	18,650	0,003	15,614	0,004	38,518	0,004
1419	Pirita gruesa	18,671	0,013	15,653	0,014	38,648	0,016
1440	Pirita fina	18,680	0,006	15,597	0,006	38,486	0,006
1440	Pirita gruesa	18,690	0,007	15,608	0,009	38,527	0,010

Notas:

Las razones isotópicas fueron corregidas para fraccionamiento de masa de 0.095 % /u.m.a.

Error patrón relativo (número medio de medidas = 60)

Blanco total durante el análisis: para cuarzo y feldespató = 153 pg y para pirita = 61 pg

El valor medio de las razones isotópicas del patrón NBS-981 para Enero a Marzo/2012:

valor \pm desviación patrón (1s): $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.898 \pm 0.003$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.440 \pm 0.003$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.542 \pm 0.010$

La revisión de los datos indica que la composición isotópica de plomo de las muestras de sulfuros y de cuarzo de las mineralizaciones de El Vapor es relativamente homogénea, lo que podría explicarse si el tamaño del patrón de circulación del fluido hidrotermal fue muy grande, de tal forma que cualquier heterogeneidad en las rocas fuente fue homogenizada por el fluido al reaccionar con ellas o si los fluidos hidrotermales no encontraron rocas con composiciones isotópicas diferentes a la que presenta la roca fuente (Tosdal *et al.*, 1999).

Probablemente la homogeneidad en los datos de plomo en El Vapor, se deba a que los fluidos hidrotermales tuvieron una movilidad relativamente restringida,

como lo indican la ubicación, disposición, tamaño y texturas de las zonas mineralizadas y poca interacción con rocas de composiciones isotópicas muy diferentes a la de las rocas fuente.

La composición isotópica de plomo en una única muestra de feldespato (plagioclasa) del Batolito de Segovia analizada, es muy cercana a la composición de los sulfuros y cuarzo, en algunos casos menos radiogénica, lo que en un principio podría indicar que estas rocas pudieron aportar parte del plomo incorporado a las mineralizaciones. Pese a lo anterior, esta información no es concluyente, pues el grado de alteración hidrotermal en rocas del Batolito de Segovia, suele ser en la mayoría de los casos extrema, de forma que la muestra de plagioclasa analizada puede reflejar alguna incorporación de plomo en su estructura posterior a la cristalización, por la interacción con los fluidos mineralizantes.

En los diagramas uranogénico y toriogénico (**Figuras 58 y 59**) del modelo plumbotectónico de Zartman & Doe (1981), los valores analíticos para sulfuros y cuarzo de las mineralizaciones de El Vapor se ubican por encima la curva de evolución isotópica orogénica, indicando que la fuente del plomo para las mineralizaciones de El Vapor, corresponde a rocas de la corteza superior. En estos mismos diagramas se aprecia que los sulfuros y el cuarzo se encuentran en la misma tendencia de evolución de los shales carbonosos de las Sedimentitas de Segovia, sugiriendo que esta unidad es la fuente más probable de los metales, aunque la cercanía en la composición isotópica de la muestra de feldespato del Batolito de Segovia, sugiere que los fluidos hidrotermales circularon por también por esta unidad, lixiviando plomo.

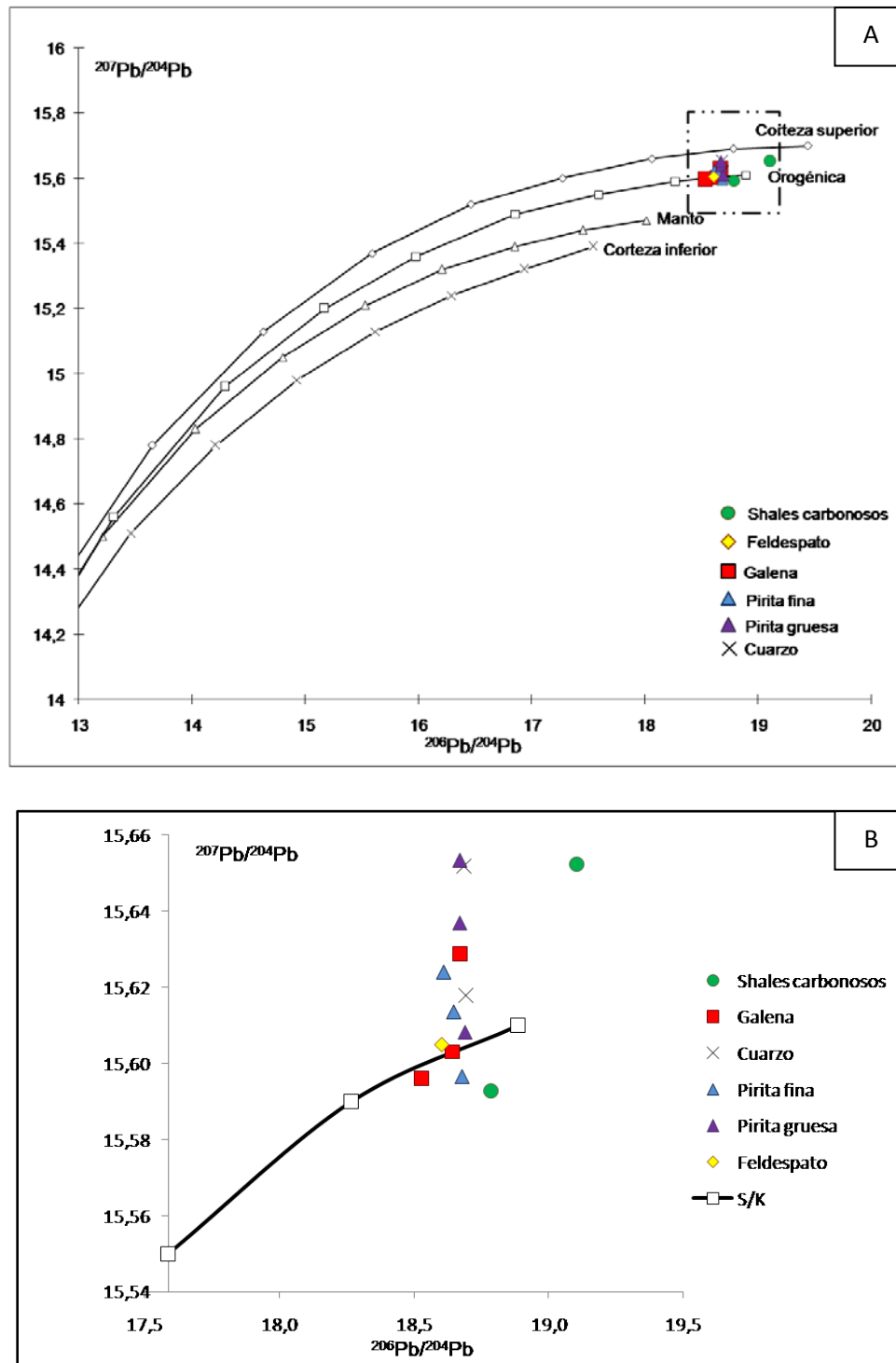
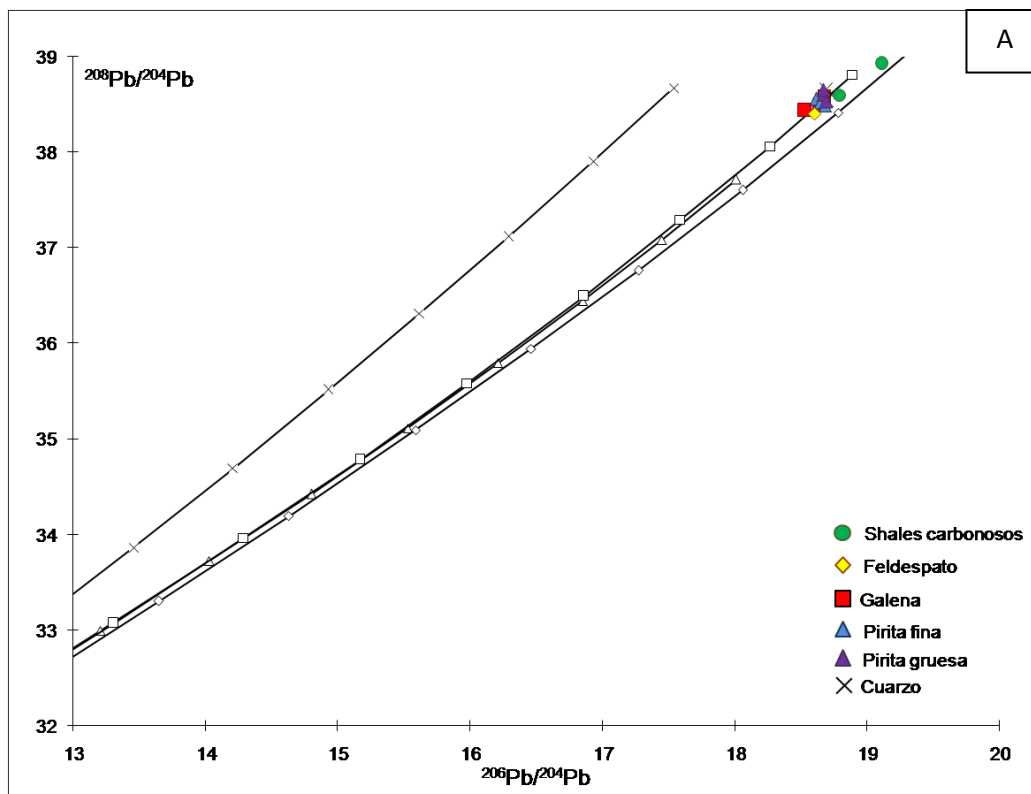


Figura 58. (A) Diagrama plumbotectónico que ilustra la evolución uranogénica de plomo para distintos reservorios isotópicos según el modelo de Zartman & Doe (1981) en el que se ilustra la composición isotópica de sulfuros y cuarzo de las mineralizaciones auríferas de El Vapor, así como de shales carbonosos de las Sedimentitas de Segovia y una muestra de feldespato del Batolito de Segovia y que se muestra en detalle en (B).

11.5.1 EDAD MODELO DE LAS MINERALIZACIONES DEL VAPOR

La aplicación de isótopos de plomo en el campo de yacimientos minerales no se restringe únicamente a la determinación de las fuentes de los metales, ni de los patrones de circulación de los fluidos hidrotermales en ellos, sino que éstos pueden ser aplicados en el cálculo de la edad modelo de un depósito particular, para lo cual los minerales óptimos son aquellos con un gran contenido de plomo y muy poco U y Th, de forma que los valores medidos actualmente representen la composición isotópica del plomo al momento de su incorporación en la estructura cristalina.

La determinación de la edad de un depósito mineral a partir de las composiciones isotópicas de Pb, se realiza utilizando el modelo de evolución isotópico propuesto por Stacey & Kramers (1975) que incluye dos estadios de evolución, separados por un evento de diferenciación global a 3.7 Ga.



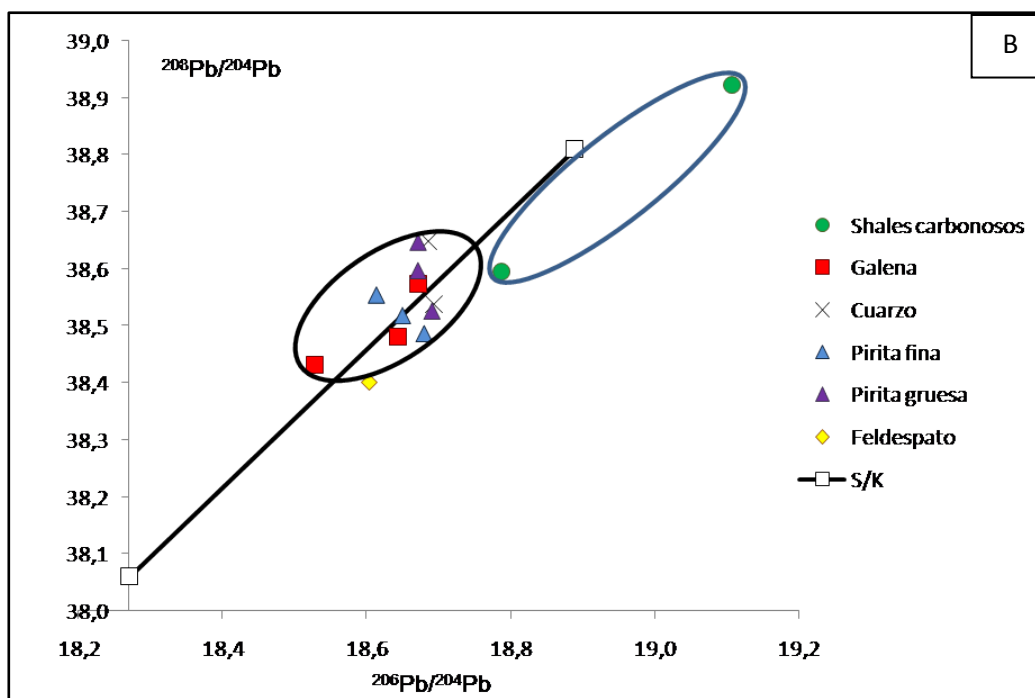


Figura 59. (A) Diagrama plumbotectónico que ilustra de evolución toriogénica de plomo para distintos reservorios isotópicos según el modelo de Zatman & Doe (1981) en el que se ilustra la composición isotópica de sulfuros y cuarzo de las mineralizaciones auríferas de El Vapor, así como de shales carbonosos de las Sedimentitas de Segovia y una muestra de feldespato del Batolito de Segovia y que se muestra en detalle en (B).

De las muestras de galena analizadas, solamente una intersecciona la curva de evolución isotópica de plomo de Stacey & Kramers (1975) en 21 Ma. (**Figura 60**), edad no definitiva, pero que por el momento representa la mejor aproximación al evento de generación de las mineralizaciones de El Vapor.

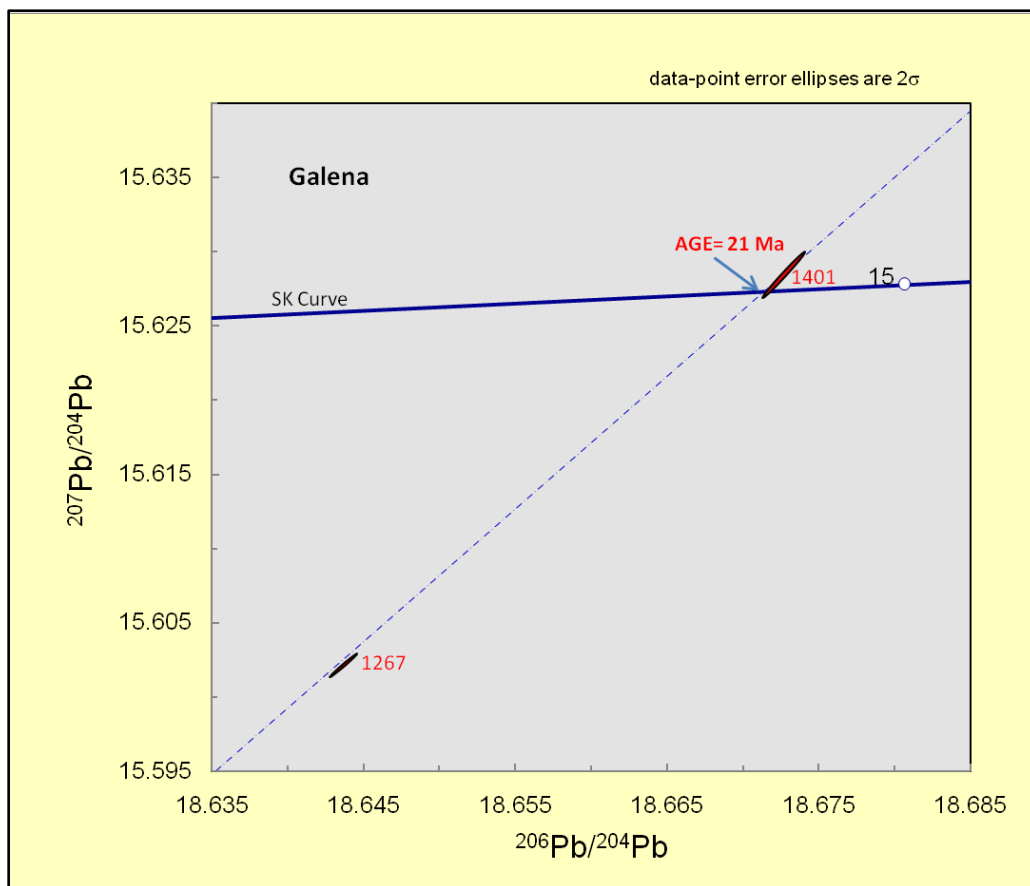


Figura 60. Edad modelo para una muestra de galena de las mineralizaciones de El Vapor, que interseca la curva de evolución de Stacey & Kramers (1975) en 21 Ma. Por el momento, esta es la mejor edad obtenida para este depósito.

12. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las mineralizaciones auríferas de El Vapor se encuentran encajadas tanto en las Sedimentitas como en el Batolito de Segovia, a ambos lados de la falla de El Nús, pero siempre en cercanías a su trazo. En la zona de estudio, además de las dos unidades encajantes, es frecuente encontrar diques de textura afanítica (aplítica), que en un principio podría pensarse, constituyen una fuente probable para la mineralización, lo que se descarta, pues se encuentran brechados, alterados y mineralizados, indicando que las mineralizaciones son posteriores a su emplazamiento.

Las zonas mineralizadas corresponden a vetas, venas y vetillas de espesor muy variable desde milimétrico hasta métrico, que constituyen un tren principal de mineralización de aproximadamente 2 Km de longitud, con rumbo variable entre N20E y N40W. Es notorio un control de mineralización mixto, relacionado a la presencia de planos de estratificación de las Sedimentitas de Segovia y estructuras menores producidas probablemente por el movimiento conjugado de las fallas de El Nús y El Bagre.

El tren principal de mineralización se emplaza a lo largo del trazo de la falla de El Nús, una estructura rumbo deslizante de segundo orden, que ha sido relacionada con el sistema de fallas de Palestina, estructura cortical profunda con desplazamiento dextrolateral que corta a unidades de la Cordillera Central Feininger *et al.* (1972).

Las vetillas, venas y venas que conforman el tren principal de mineralización al oriente de la falla de El Nús, se caracterizan por corresponder a estructuras sinuosas, discontinuas, anastomosadas, de textura brechoide, que en algunos casos embeben fragmentos angulares de la roca de caja, pero que presentan zonación incipiente, con halos de alteración delgados y pirita de grano fino hacia los respaldos, mientras que hacia la parte central se presentan sulfuros de grano grueso (principalmente pirita) con agregados de cuarzo lechoso masivo y hacia el centro de las mismas, estructuras drusiformes rellenas por cristales de cuarzo con

textura en peine. Estas texturas de mineralización, son indicativas de la cristalización de forma sin-cinemática en espacios abiertos con texturas brechoides, probablemente en la transición de un régimen de deformación frágil-dúctil, generados por la acción del movimiento de la falla de El Nús, aprovechando además, los planos de estratificación de las Sedimentitas de Segovia. La presencia de estructuras drusiformes rellenas con cristales bien desarrollados de cuarzo con textura en peine, hacia la parte central de las estructuras mineralizadas, implica la cristalización lenta en condiciones fisicoquímicas relativamente estables en un último evento de depósito.

Hacia el occidente de la falla de El Nús, en rocas del Batolito de Segovia, las mineralizaciones de El Vapor se presentan como venas y vetas centimétricas con halos de alteración delgados bien desarrollados. Estas estructuras presentan un carácter zonado, con presencia de agregados masivos de cuarzo lechoso hacia los respaldos, mientras que los sulfuros ocupan la parte media, siendo posible en algunos casos observar hacia la parte central, la presencia de estructuras drusiformes rellenas por cuarzo con textura en peine o “comb”. Estas texturas de mineralización son indicativas de la circulación constante y precipitación continua de minerales de mena y ganga en espacios abiertos, que en el caso del cuarzo con textura drusiforme, representan condiciones fisicoquímicas relativamente estables y probablemente una precipitación lenta. La evidencia de brechamiento de los minerales de mena, indica la existencia de un periodo de actividad tectónica importante, sin embargo, éste fue probablemente de menor intensidad que hacia el oriente de la falla de El Nús.

Secuencia de eventos mineralizantes en El Vapor

Las mineralizaciones auríferas de El Vapor se formaron a través de una secuencia de eventos de depósito que se inició con la reacción de fluidos hidrotermales de pH cercano a la neutralidad con las rocas de caja, lo que generó hacia los respaldos de las zonas mineralizadas, halos de alteración compuestos de una primera generación de pirita de grano fino, asociada con illita, moscovita, cuarzo

de textura mosaico de grano fino, así como carbonato de grano fino, cloritización y formación de epidota a partir de cristales de anfíbol en el Batolito de Segovia.

Con posterioridad al evento de alteración hidrotermal identificado, se produjo de manera sin-cinemática (como lo sugieren la discontinuidad y disposición anastomosada de las vetillas, venas y vetas) hacia el oriente del trazo de la falla de El Nús la cristalización de agregados cristalinos de cuarzo de textura masiva acompañados de cristales subidiomórficos de pirita de grano grueso con inclusiones sólidas de galena, esfalerita, calcopirita y pirrotina, así como inclusiones de oro electrum dentro de la pirita. Ocasionalmente en este evento de mineralización se reconoció la existencia de cristales subidiomórficos de esfalerita intercrecidos con pirita de grano grueso. Hacia el occidente de la falla de El Nús, las texturas zonadas de las vetas sugieren la cristalización en espacios abiertos sometidos a una menor deformación.

En algunos sectores, en cercanías al trazo de la falla de El Nús y estructuras menores, el primer evento de mineralización se caracteriza por la presencia de vetillas y venas centimétricas en stockwork y brechas hidrotermales matriz soportadas, que embeben fragmentos de las rocas caja.

A partir del análisis microtermométrico de inclusiones fluidas y espectroscopía Raman en inclusiones fluidas primarias y pseudosecundarias de cristales de cuarzo de textura masiva, pertenecientes al primer evento de mineralización identificado, se puede interpretar que los fluidos hidrotermales en El Vapor, están compuestos principalmente por $H_2O + CO_2$, con cantidades variables de N_2 y CH_4 , relacionadas a un proceso de reacción con las rocas caja, con salinidad baja a moderada, que en general no muestran cambios a lo largo del tren principal de mineralización y son identificados en muestras localizadas en ambos lados de la falla de El Nús. El análisis microtermométrico indica que las temperaturas y presiones mínimas de entrapamiento del primer evento mineralizante se encuentran entre 213 y 340°C y entre 50 y 300 MPa, lo que ubica a este depósito a una profundidad de formación entre 2 y 10 Km.

La gran abundancia de pirita, poca cantidad de pirrotina (como fue observado en el análisis petrográfico) y la ausencia total de arsenopirita, generadas a un pH cercano a la neutralidad en el rango de temperatura revelado por las inclusiones fluidas, es compatible con el campo de estabilidad de la pirita, lo que indica que en El Vapor los fluidos mineralizantes responsables del primer evento de mineralización fueron reducidos.

Con base en las condiciones fisicoquímicas establecidas para el primer evento de mineralización, se interpreta que el oro fue transportado en forma de complejos bisulfurados, desestabilizados por un proceso de mezcla isothermal de fluidos y reducción con las rocas caja, reconocidos a partir del análisis microtermométrico y espectroscópico realizado.

A partir de análisis isotópicos de $\delta^{34}\text{S}$ en cristales de pirita, esfalerita y galena pertenecientes al primer evento de mineralización, fue posible calcular la composición isotópica del fluido mineralizante entre +1.3 y +5.5‰, así como temperaturas de fraccionamiento isotópico entre 275.8 y 322.8, concordantes con las temperaturas de homogenización de inclusiones fluidas, lo que indica que probablemente se alcanzó el equilibrio isotópico.

Pequeñas variaciones en las condiciones fisicoquímicas (pH y $f\text{O}_2$) de estos fluidos mineralizantes, evidenciadas por cambios en las composiciones de $\delta^{34}\text{S}$ de sulfuros con valores progresivamente más positivos hacia el nororiente en las Sedimentitas de Segovia, reflejan un proceso de reacción de éstos con los shales carbonosos de esta unidad y pueden sugerir un patrón de paleoflujo desde el suroccidente hacia el nororiente.

En El Vapor, el análisis petrográfico permitió definir que luego de un periodo de cizallamiento y fracturamiento intenso en un régimen frágil, probablemente relacionado con el movimiento de la falla de El Nús, se produjo la recrystalización en estado sólido de cristales de cuarzo masivo y la precipitación de cuarzo de textura mosaico, así como de cristales subidimórficos de galena de grano grueso, calcopirita, esfalerita y gran cantidad de oro electrum, que además rellenan

cavidades y espacios abiertos adoptando su forma. La deformación de este evento de mineralización se evidencia en la deflexión de huellas de exfoliación (“pits” triangulares) en cristales de galena.

Hacia el occidente de la falla de El Nús, la deformación observada en el segundo evento de mineralización es menor, pues aunque los minerales del primer evento se encuentran fracturados, se evidencia una zonación mineralógica “tranquila” hacia la parte central de las zonas mineralizadas.

Debido al tamaño de los cristales de cuarzo en mosaico y a la naturaleza deformada del mismo, no fue posible realizar el análisis microtermométrico de inclusiones fluidas, sin embargo, observaciones petrográficas de inclusiones fluidas en esfalerita de este evento de mineralización, indican la presencia de inclusiones con presencia de una fase de vapor y líquido carbónico, que permiten inferir que los fluidos hidrotermales pueden presentar características similares. Lo anterior, sin duda, está pendiente por confirmar.

El segundo evento de mineralización observado implica un cambio en el tamaño de los minerales depositados, así como un cambio mineralógico marcado por la desaparición de pirrotina y aparición hacia el final del mismo, de Proustita-Pirargirita, lo que es indicativo de un incremento del estado de oxidación del azufre del fluido hidrotermal, desde uno reducido a uno un poco más oxidado y probablemente un poco más caliente, si los datos de temperaturas de fraccionamiento isotópico (367.8°C), calculada a partir de la composición de $\delta^{34}\text{S}$.

Un tercer y último evento de mineralización reconocido en El Vapor, se produjo como consecuencia de la cristalización en espacios abiertos hacia la parte central de las zonas mineralizadas, de cristales hialinos de cuarzo con textura en peine, rellenan vetillas milimétricas sinuosas que cortan la mineralogía existente y que están acompañadas por cristales de piritita y esfalerita de color claro. La asociación mineralógica y las texturas de relleno de espacios abiertos, con cristalización de cuarzo desde las paredes de las cavidades hacia el centro, son indicativas de un estadio de mineralización desarrollado en condiciones fisicoquímicas mucho más

“tranquilas” que las de los dos primeros estadios. Así mismo, la presencia de esfalerita de color claro, sugiere que los fluidos hidrotermales responsables de este evento, presentaron un estado de sulfuración más oxidado.

Finalmente, como resultado de la infiltración de fluidos meteóricos en el sistema, se produjo la alteración supergénica hacia los bordes de los cristales de calcopirita de covelina y bornita mostrando texturas de reemplazamiento

Análisis de microsonda electrónica efectuados en cristales de oro tanto del primer como segundo evento de mineralización indican contenidos de Au entre 43 y 84 Wt%, lo que es concordante con las observaciones petrográficas. Estos mismos análisis evidencian contenidos despreciables de Bi y As en el sistema hidrotermal y muestran que las diferentes generaciones de galena no contienen cantidades apreciables de plata y que no existen diferencias composicionales entre los cristales de pirita gruesa y fina, lo que sugiere que probablemente no existieron diferencias notables en la composición química de los fluidos hidrotermales entre los diferentes eventos de mineralización.

Aunque para las mineralizaciones de El Vapor, no se puede asignar a alguna de las unidades encajantes como la fuente del azufre, debido a que no se dispone de la composición isotópica de las unidades encajantes, lejos de las zonas mineralizadas, los valores relativamente uniformes de $\delta^{34}\text{S}$ sugieren que ésta fue única y relativamente uniforme.

Por su parte, la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y δD , obtenida a partir del análisis de minerales de alteración hidrotermal, consecuencia de la reacción del fluido(s) hidrotermal(es) con las rocas de caja durante el evento premineral, calculada a 300°C en equilibrio con moscovita y cuarzo, presenta valores entre 6 y 12‰ y -17 y -21‰ respectivamente, compatibles con un origen metamórfico, descartando la participación de agua meteórica en el sistema. Por su parte, la composición de δD medida a partir de inclusiones fluidas en cuarzo de textura masiva del primer evento de mineralización, presenta valores mucho más variables y más ligeros, que pueden relacionarse con la presencia de CH_4 en éstas, por un proceso de

reducción del fluido por reacción con rocas ricas en materia carbonosa, pero que además pueden estar influenciados por la presencia de inclusiones secundarias que no representan el fluido hidrotermal.

Finalmente, resultados de análisis isotópicos de Pb, en sulfuros representativos del evento premineral y del primer y segundo evento de mineralización, presentan valores radiogénicos, indicativos de una fuente de la corteza superior y que yacen en un tren de evolución entre una muestra de feldespato extraída del Batolito de Segovia y shales carbonosos de las Sedimentitas de Segovia, sugiriendo que los fluidos hidrotermales circularon por estas dos unidades extrayendo plomo, posteriormente incorporado en los sulfuros.

A partir de estos mismos análisis, la edad modelo de las mineralizaciones de El Vapor, calculada con base en las composiciones isotópicas de plomo es de 21 Ma., edad no definitiva, pues corresponde solamente a una de las muestra analizadas.

¿A qué tipo de depósito mineral pueden corresponder las mineralizaciones auríferas de El Vapor?

La aplicación de modelos genéticos y descriptivos al campo de yacimientos minerales, en particular al reconocimiento de características comunes en depósitos localizados en una zona particular, es una herramienta importante en la aplicación de métodos de exploración, en especial para ubicar espacial y temporalmente a un depósito determinado, así como identificar el potencial de otras manifestaciones minerales en la misma área. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario enmarcar a El Vapor en un determinado tipo de depósito.

Dos tipos de depósitos epigenéticos vetiformes han sido descritos en la literatura geológica y son reconocidos actualmente: epitermales y orogénicos.

Los depósitos epitermales se caracterizan porque se desarrollan en zonas de alta permeabilidad en lo que alguna vez correspondió a un sistema hidrotermal activo, por lo que estos depósitos se hospedan generalmente en rocas volcánicas

coetáneas o más antiguas, en rocas de basamento o en rocas subvolcánicas, relacionadas a magmatismo calco-alcalino en arcos magmáticos en márgenes convergentes, así como en cuencas tras-arco y ambientes de rift postcolisional, en este último caso relacionados a magmas toleíticos.

Los estilos de mineralización en depósitos epitermales son variables, incluyendo la presencia de venas, arreglos en stockwork, brechas hidrotermales y brechas diatrema así como disseminaciones, en el caso de depósitos epitermales de alta sulfuración, con una complejidad estructural relativamente baja.

Con base en el estado de oxidación de las especies sulfurosas acuosas, los depósitos epitermales han sido clasificados en tres subtipos, de los cuales, los depósitos de intermedia y baja sulfuración tienden a desarrollarse preferencialmente como estructuras vetiformes, en las que son características las texturas bandeadas, coloformes y crustiformes.

En algunos, aunque no en todos los depósitos epitermales, se ha podido interpretar una relación directa entre la composición de los fluidos mineralizantes y una fuente ígnea (Simmons et al., 2005, Sillitoe & Hedenquist, 2003), de manera que éstos se caracterizan por presentar una salinidad moderada (5-20% Wt NaCl Equiv.), por estar compuestos por una mezcla de fluidos magmáticos con distinto contenido de aguas meteóricas, un bajo contenido de CO₂ y por desarrollarse en temperaturas de entre 150 y 300°C a presiones bajas (0.1Kbar), relacionadas con un emplazamiento en niveles corticales someros en regímenes de deformación frágil.

Los depósitos orogénicos por su parte, se forman durante las etapas tardías de orogénesis y están encajados normalmente en rocas volcánicas máficas, rocas intrusivas o secuencias volcanosedimentarias, con metamorfismo regional en facies esquistos verde (aunque se encuentran algunos depósitos en rocas con

facies granulita), desarrollados de forma adyacente a fallas corticales profundas, mostrando una historia estructural compleja.

Dependiendo del régimen de deformación, los estilos de mineralización pueden variar desde stockworks y brechas en ambientes frágiles, pasando por estructuras vetiformes laminadas, sigmoidales y de relleno de fracturas en la transición frágil-dúctil, hasta reemplazamientos y diseminaciones en ambientes profundos en un régimen dúctil.

Los fluidos hidrotermales responsables de la formación de los depósitos orogénicos se caracterizan por ser muy ricos en CO₂ con cantidades variables de CH₄ y N₂ y por estar enriquecidos en ¹⁸O, con salinidades bajas a moderadas (3-12 Wt% NaCl equiv.) con temperaturas entre 200 y 500°C y presiones entre a 0.5-4.5 Kbar. De forma característica en los depósitos orogénicos se ha interpretado que el oro se transporta en forma de complejos bisulfurados relativamente reducidos (Groves et al., 1998, Goldfarb et al. 2001, 2005).

La ausencia de evidencias de magmatismo, el tipo de roca encajante, las características morfológicas y texturales (venas discontinuas, anastomosadas y sigmoidales, brechoides con ausencia de texturas coloformes y crustiformes), la ubicación del depósito en cercanías a la falla de El Nús una estructura de segundo orden relacionada a una falla cortical profunda como lo es Palestina, con un control estructural evidente, además de un control litológico, así como la naturaleza reducida de los fluidos hidrotermales acuo-carbónicos, con cantidades variables de CH₄ y N₂, de salinidad moderada a baja, con un pH cercano a la neutralidad, con temperaturas y presiones de formación entre 213 y 340°C y 50 a 300 MPa, concordantes con una profundidad de 2 a 10 Km, en la transición entre un régimen frágil y dúctil y finalmente la evidencia inequívoca de una composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y δD concordante con origen metamórfico para los mismos, son características que indican que El Vapor corresponde a un depósito tipo Oro Orogénico (Böhlke, 1982; Groves et al., 1998; Goldfarb et al., 2005).

Más aun, algunas de las características de El Vapor son notoriamente similares a depósitos emplazados en secuencias turbidíticas como Muruntao (Drew *et al.*, 1996; Graupner *et al.*, 2001), North Deborah en el cinturón de Bendigo (Jia *et al.*, 2000), Wattle Gully en Victoria (Cox *et al.*, 1995) y Dungash (Zoheir *et al.*, 2008).

Lo anterior implica que para el momento de formación de las mineralizaciones auríferas de El Vapor, existió un proceso de orogénesis del hoy flanco oriental de la Cordillera Central. Para el Mioceno Temprano, un período de compresión relacionado con la acreción del denominado terreno Gorgona según Cediel *et al.* (2003) y/o un cambio en la dirección de convergencia de la placa de Nazca, que produjo la reactivación de estructuras del Eoceno en el valle del Magdalena y la generación de la discordancia del Oligoceno (Cooper *et al.*, 1995), puede ser el proceso que explique la generación de El Vapor.

De acuerdo a las características encontradas, las mineralizaciones de El Vapor corresponderían a un depósito epizonal a mesozonal, de manera que existe una gran posibilidad que se extiendan considerablemente en profundidad sin cambios importantes en la mineralogía y en la cantidad de oro, lo que incrementa las posibilidades de desarrollo de un proyecto minero en la zona. Así mismo, la presencia de un depósito de este tipo, amplía las perspectivas exploratorias, en especial relacionadas a las Sedimentitas de Segovia, fuente más probable de los metales.

13. RECOMENDACIONES

Hasta ahora, el estudio de las características de las mineralizaciones de El Vapor se ha efectuado teniendo como base las labores subterráneas existentes en el área y que representan la mejor fuente disponible de información, sin embargo es necesario ampliar el conocimiento del depósito en profundidad, por lo que se hace indispensable contar con información proveniente de perforaciones.

Para determinar con mayor certeza si existen variaciones en la composición del fluido mineralizante, es necesario analizar un mayor número de secciones doblemente pulidas mediante microtermometría y espectroscopía, en especial en labores mineras ubicadas hacia el oriente y occidente de la falla El Nús, lejos de su trazo principal.

Con el fin de afinar una aproximación a un modelo genético para las mineralizaciones de El Vapor, indispensable para determinar métodos exploratorios y de explotación adecuados, es necesario efectuar un mayor número de análisis de isótopos de oxígeno y deuterio, para contar con mayor densidad de datos que confirmen el tipo de fluido que generó el depósito.

Es necesario determinar si alguna de las unidades encajantes de las mineralizaciones corresponde a la fuente del azufre, por lo que se hace necesario analizar muestras de sulfuros lejos de las labores mineras. Debido a que las variaciones espaciales en la composición isotópica del azufre en los sulfuros puede indicar un patrón de paleoflujo en el área, debe contarse con un mayor número de análisis, lo que permitiría determinar si dicho patrón se presenta a nivel regional.

Finalmente, debido a que la edad modelo de plomo se obtuvo solamente a partir de una muestra de galena, para determinar con certeza la edad absoluta del depósito y establecer su relación con la historia metalogenética del flanco oriental de la Cordillera Central, es indispensable contar con dataciones absolutas, por lo que se sugiere realizar Ar-Ar en moscovita.

14. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bakker, R. J., 2003. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, Vol. 194, pp. 3-23.

Bakker, R. J., 1997. Clathrates: Computer programs to calculate fluid inclusion V-X properties using clathrate melting temperatures. *Computers & Geosciences*, v. 23, pp. 1-18.

Bakker, R. J., Brown, P. E., 2003. Computer modelling in fluid inclusion research. En: *Fluid Inclusions, Analysis and Interpretation* I.M. Samson, A.J. Anderson, and D.D. Marshall, Eds., Short Course Vol. 32, Mineralogical Association of Canada, pp. 175-212.

Bakker, R.J., Diamond, L.W., 2000. Determination of the composition and molar volume of H₂O-CO₂ fluid inclusions by microthermometry. *Geochim. Cosmochim. Acta* 64, pp. 1753-1764.

Bodnar, R.J., 2003c. Re-equilibration of fluid inclusions. En: *Fluid Inclusions, Analysis and Interpretation* I.M. Samson, A.J. Anderson, and D.D. Marshall, Eds., Short Course Vol. 32, Mineralogical Association of Canada, pp. 213-231.

Bodnar, R.J., 2003b. Interpretation of data from aqueous-electrolyte fluid inclusions. En: *Fluid Inclusions, Analysis and Interpretation* I.M. Samson, A.J. Anderson, and D.D. Marshall, Eds., Short Course Vol. 32, Mineralogical Association of Canada, pp. 81-100.

Bodnar, R.J., 2003a. Introduction to fluid inclusions. En: *Fluid Inclusions, Analysis and Interpretation* I.M. Samson, A.J. Anderson, and D.D. Marshall, Eds., Short Course Vol. 32, Mineralogical Association of Canada, pp. 1-8.

Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O–NaCl solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 57, pp. 683–684.

Bohlke, J.K., 1982. Orogenic (metamorphic-hosted) gold–quartz veins. *U.S. Geol. Surv., Open-file Rep.* 795, pp. 70–76.

Burke, E.A.J., 2001. Raman microspectrometry of fluid inclusions. *Lithos* 55, pp. 139–158.

Cardona, A., Valencia, V., Garzón, A., Montes, C., Ojeda, G., Ruiz, J., Weber, M., 2010. Permian to Triassic I to S-type magmatic switch in the northeast Sierra Nevada de Santa Marta and adjacent regions, Colombian Caribbean: tectonic setting and implications within Pangea paleogeography. *Journal of South American Earth Sciences* 29, pp. 772–783.

Cediel, F., Shaw, R.P., Cáceres, C., 2003. Tectonic assembly of the Northern Andean Block. In: Bartolini, C., Buffler, R.T., Blickwede, J. (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, and Plate Tectonics*. AAPG Memoir, Vol. 79, pp. 815–848.

Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., Howe, S., Martinez, J., Peñas, R., Pulham, A. J., Taborda, A., 1995. Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera and middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, Vol. 79, N°10, pp. 1421–1443.

Collins, P.L.F., 1979. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Economic Geology*, Vol. 74, pp. 1435–1444.

Cox, S.F., Sun, S.S., Etheridge, M.A., Wall, V.J., Potter, T.F., 1995. Structural and geochemical controls on the development of turbidite-hosted gold quartz vein

deposits, Wattle Gully mine, central Victoria, Australia. *Economic Geology*, Vol. 90, pp. 1722–1746.

Cox, S.F., Wall, V.J., Etheridge, M.A., Potter, T.F., 1991a. Deformational and metamorphic processes in the formation of mesothermal vein-hosted gold deposits—examples from the Lachlan fold belt in central Victoria, Australia: *Ore Geology Reviews*. Vol. 6, pp. 391–423.

Diamond, L.W., 2003a. Introduction to gas-bearing aqueous fluid inclusions. En: *Fluid Inclusions, Analysis and Interpretation* I.M. Samson, A.J. Anderson, and D.D. Marshall, Eds., Short Course Vol. 32, Mineralogical Association of Canada, pp. 101-158.

Diamond, L.W., 2001. Review of the systematics of CO₂-H₂O fluid inclusions. *Lithos* 55, pp. 69-99.

Diamond, L.W., 1994. Salinity of multivolátiles fluid inclusions determined from clathrate hydrate stability. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58, pp. 19-41.

Diamond, L.W., 1990. Fluid inclusion evidence for P-V-T-X evolution of hydrothermal solutions in Late-Alpine gold-quartz veins at Brusson, Val d'Ayas, NW Italian Alps. *Amer. J. Sci.* 290, pp. 912-958.

Dong, G., Morrison, G., Jaireth, S., 1995. Quartz textures in epithermal veins, Queensland –classification, origin and implication. *Economic Geology*, Vol. 90, pp. 1841-1856.

Drew, L.J., Berger, B.R., Kurbanov, N.K., 1996. Geology and structural evolution of the Muruntau gold deposit, Kyzylkum desert, Uzbekistan. *Ore Geology Reviews* 11, pp. 175-196.

Duque - Caro, H., 1990. El Bloque Chocó en el Noroccidente Suramericano: Implicaciones Estructurales, Tectonoestratigráficas y Paleogeográficas. Boletín Geológico de INGEOMINAS, Vol. 31 No. 1. pp. 47 - 71.

Faure, G., 1977. Principles of isotope geology. New York, Jhon Wiley and Sons, 464 p.

Feininger, T., Barrero, D., Castro, N., 1972. Geología de Antioquia y Caldas (Subzona II-B). Boletín Geológico Ingeominas. Vol. 20 (2), Bogotá. pp. 1-173.

Feininger, T., 1970. The Palestina fault, Colombia. Geological Society of America Bulletin, Vol. 81, pp. 1201-1216.

Frezzotti, M.L., Tecce, F., Casagli, A., 2012. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. Journal of Geochemical Exploration 112, pp. 1-20.

Goldfarb., R.J., Baker, T., Dubé, B., Groves, D.I., Hart, C.R., Gosselin, P., 2005. Distribution, character and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume, pp. 407-450.

Goldstein, R.H., 2003. Petrographic analysis of fluid inclusions. En: Fluid Inclusions, Analysis and Interpretation I.M. Samson, A.J. Anderson, and D.D. Marshall, Eds., Short Course Vol. 32, Mineralogical Association of Canada, pp.9-53.

González, H., 2001. Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Memoria Explicativa. Ingeominas. 240 p.

González, H., 1996. Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Geología, recursos minerales y amenazas potenciales. Memoria Explicativa. Ingeominas. 213 p.

Graupner, T., Kempe, U., Spooner, E.T.C., Bray, C.J., Kremenetsky, A.A., Irmer, G., 2001. Microthermometric, laser Raman spectroscopic and volatile-ion chromatographic analysis of hydrothermal fluids in the Paleozoic Muruntau Au-bearing quartz vein ore field, Uzbekistan. *Economic Geology*, Vol. 96, pp. 1-23.

Groves, D.I., Goldfarb, R. J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews* 13, pp. 7-27.

Hall, R., Feininger, T., Barrero, D., Rico, H., Álvarez, J., 1970. Boletín Geológico zona II Antioquia y Caldas. Recursos minerales de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas, Vol. XVIII N° 2. 34-35.

Hayashi, K. I., Ohmoto, H., 1991. Solubility of gold in NaCl- and H₂S-bearing aqueous solutions at 250-350°C. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, pp. 2111-2126.

Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras (INGEOMINAS)., 1987. Recursos minerales de Colombia. Pub. Geol. Esp., Bogotá, 199 p.

Jia, Y., Li, X., Kerrich, R., 2000. A fluid inclusion study of Au-bearing quartz vein systems in the Central and North Deborah deposits of the Bendigo gold field, Central Victoria, Australia. *Economic Geology*, Vol. 95, pp. 467-494.

Johnson, E.L., Hollister, L.S., 1995. Syndeformational fluid trapping in quartz: Determining the pressure-temperature conditions of deformation from fluid inclusions and the formation of pure CO₂ fluid inclusions during grain boundary migration: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 13, pp. 239–249.

Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68, pp. 277-279.

Ohmoto, H., 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, Vol. 67, pp. 551-578.

Ordóñez-Carmona, O., Restrepo Álvarez, J.J., Pimentel, M.M., 2006. Geochronological and isotopical review of pre-Devonian crustal basement of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 21, pp. 372–382.

Ordóñez-Carmona, O., Pimentel, M.M., Restrepo, J.J., 1999. Rocas grenvillianas en la región de Puerto Berrío, Antioquia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 23 (87), pp. 225 -232.

Peng, D.Y., Robinson, D.B., 1976. A new two constant equation of state. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 15, pp. 59-64.

Proingecom Ltda., 2003. Integración de áreas mineras para la explotación aurífera en el sector del Vapor del municipio de Puerto Berrío, Departamento de Antioquia. Convenio 073 de 2002 Minercol – Puerto Berrío.

Pulido, N., 2003. Seismotectonics of the Northern Andes (Colombia) and the development of seismic networks. *Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, Special Edition, pp. 69-79.

Restrepo, J.J., Toussaint, J.F., 1988. Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. *Episodes* 7, pp. 189–193.

Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Min. Soc. Am. Rev. in Min.* 12, 644 p.

Rodríguez, C. J., Pernet, A., 1983. Recursos minerales de Antioquia. Boletín Geológico. INGEOMINAS, Vol. 26 N°3. Informe 1885, Bogotá, 116 p.

Seward, T. M., 1984. The transport and deposition of gold in hydrothermal systems. En Gold'82: The geology , geochemistry and genesis of gold deposits (Ed. R.P Foster), pp. 165-181.

Seward, T. M., 1973. Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal solutions. Geochim. Cosmochim. Acta 37, pp. 370-399.

Sheppard, M. F., 1986. Characterization and isotopic variations in natural waters: Mineralogy, v. 16, pp. 165-183.

Sillitoe, R., (2000). Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. Reviews in Economic Geology, Volume 13. Canada.

Stacey, J.S., Kramers, J.D., 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by two-stage model. Earth Planet. Sci. Letters 26, pp. 207-221.

Suzuoki, T., Epstein, S., 1976. Hydrogen isotope fractionation between OH-bearing minerals and water. Geochim. Cosmochim. Acta 40, pp. 1229-1240.

Tosdal, R. M., Wooden, J. L., Bouse, R. M., 1999. Pb isotopes, ore deposits and metallogenic terranes. En Application of radiogenic isotopes to ore deposit research and exploration. Reviews in Economic Geology, Vol.1, pp. 1-28.

Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., Beltrán, A., 2011. Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. Lithos 125, pp. 875-896.

Vinasco, C.J., Cordani, U.G., González, H., Weber, M., Pelaez, C., 2006. Geochronological, isotopic, and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 21, pp. 355–371.

Wilkinson, P. J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55 (1-4), pp. 229-272.

Zartman, R.E., Doe, B.R., 1981. Plumbotectonics-the model. *Tectonophysics* 75, pp. 135-162.

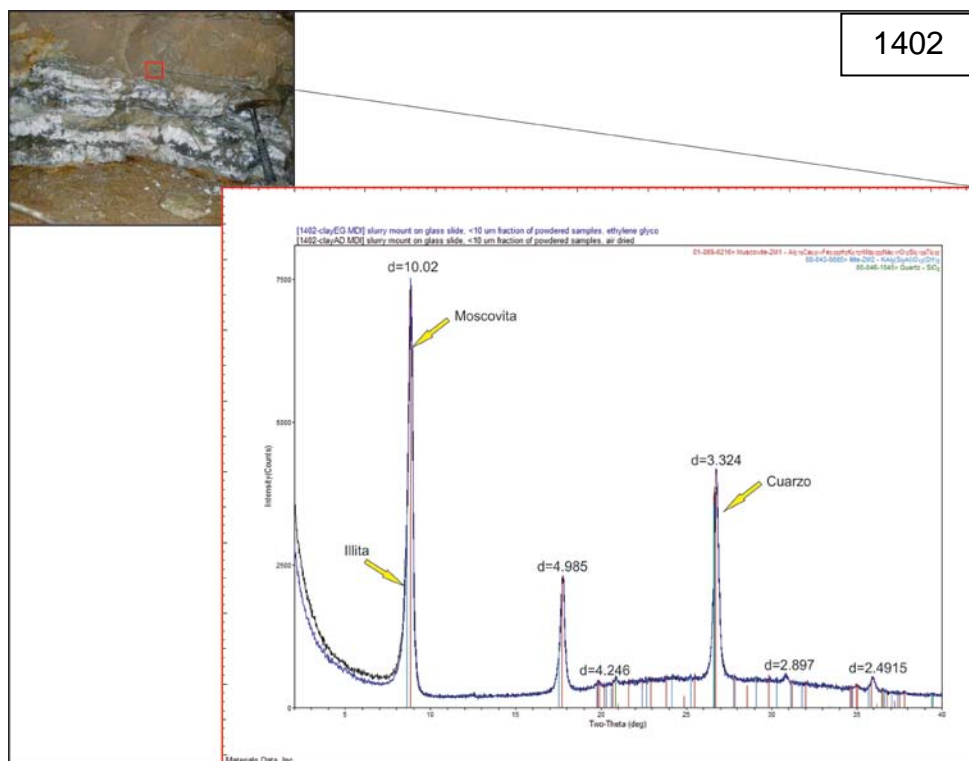
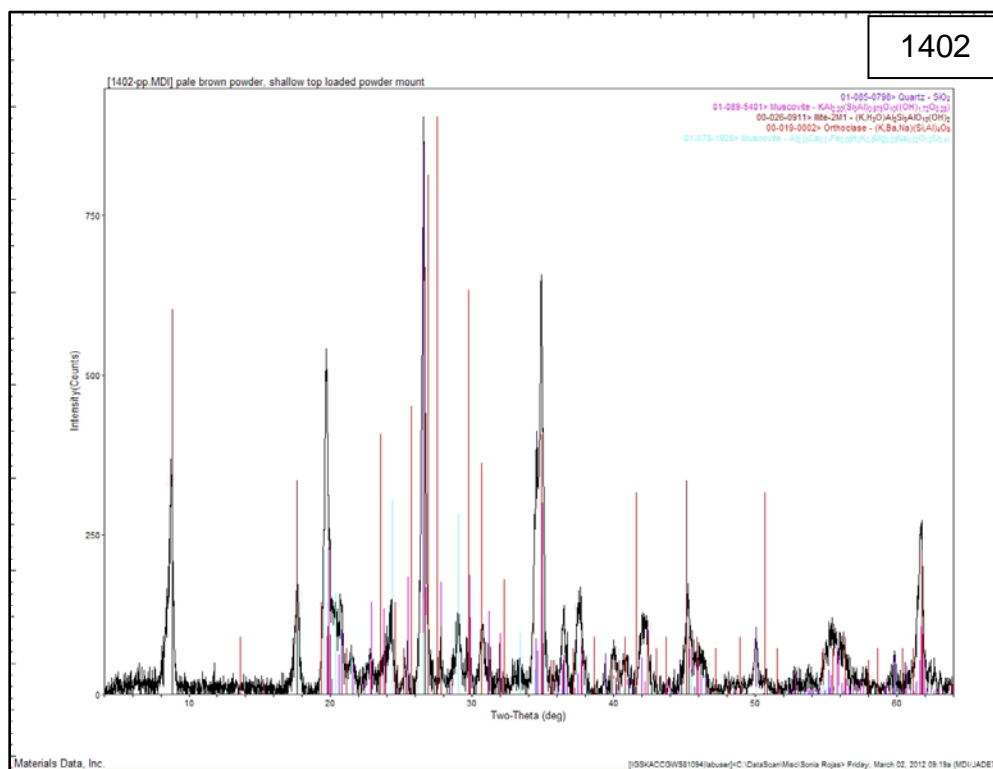
Zhang, Y.G., Frantz, J.D., 1987. Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl–KCl–CaCl₂–H₂O using synthetic fluid inclusions. *Chem. Geol.* 64, pp. 335-350.

Zheng, Y.-F., 1993. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates. *Earth Planet. Sci. Lett.* 120, pp. 247-263.

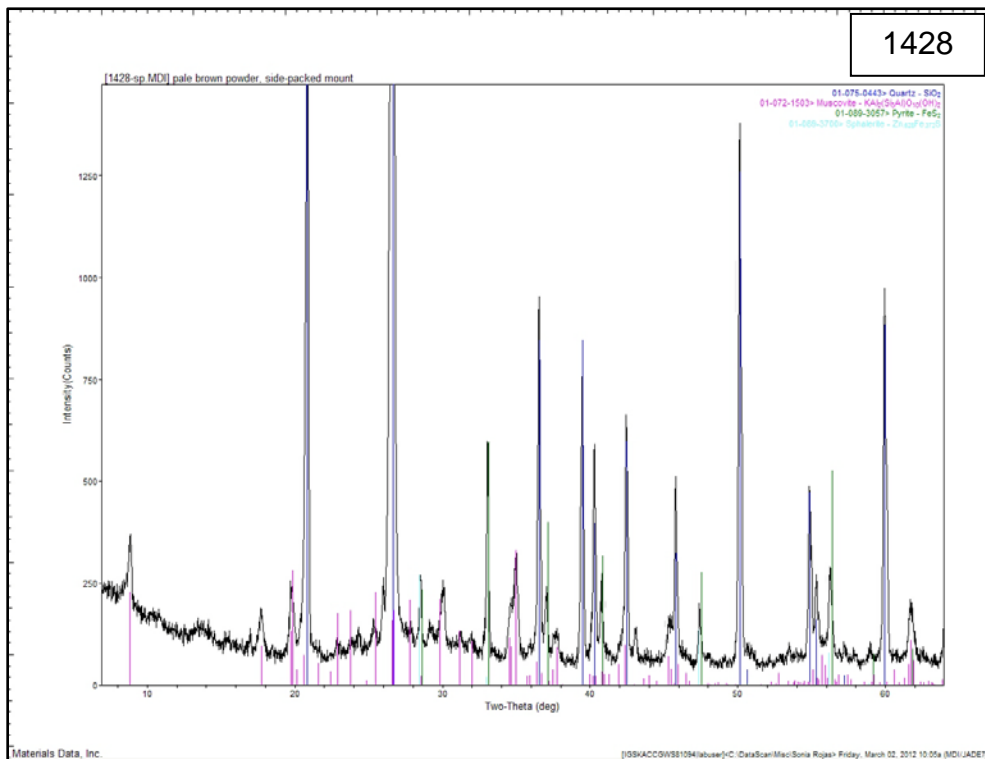
Zoheir, B. A., El-Shazly, A. K., Helba, B., Khalil, K. I., Bodnar, R. J., 2008. Origin and evolution of the Um Egat and Dungash orogenic gold deposits, Egyptian eastern desert: evidence from fluid inclusions in quartz. *Economic Geology*, Vol. 103, pp. 405-424.

ANEXOS

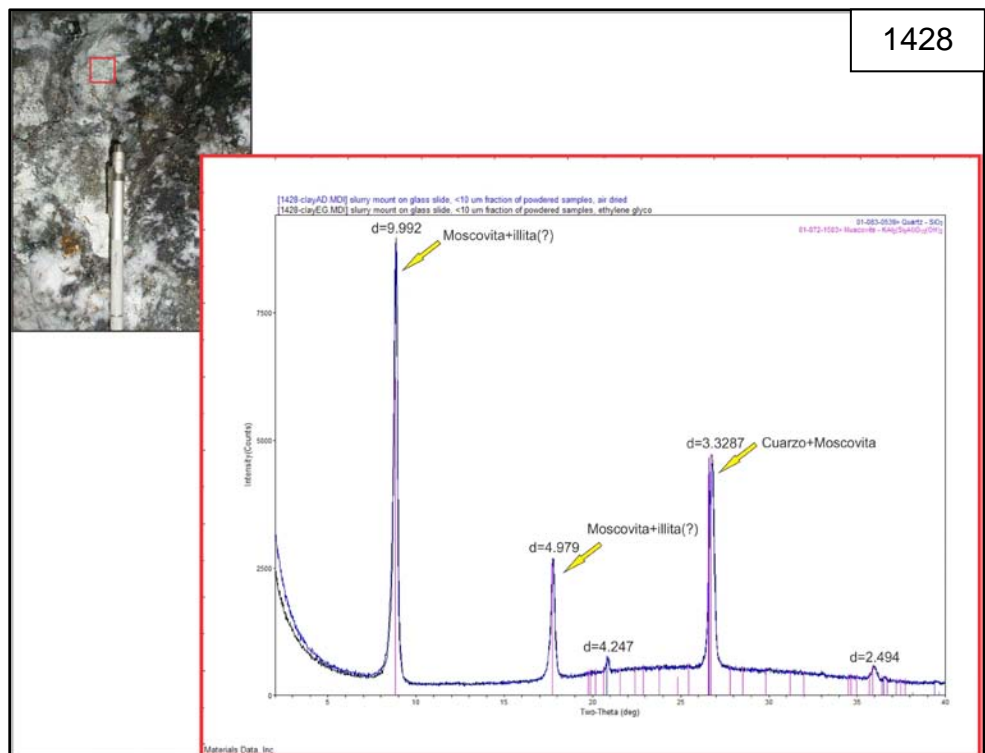
ANEXO 1. ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X



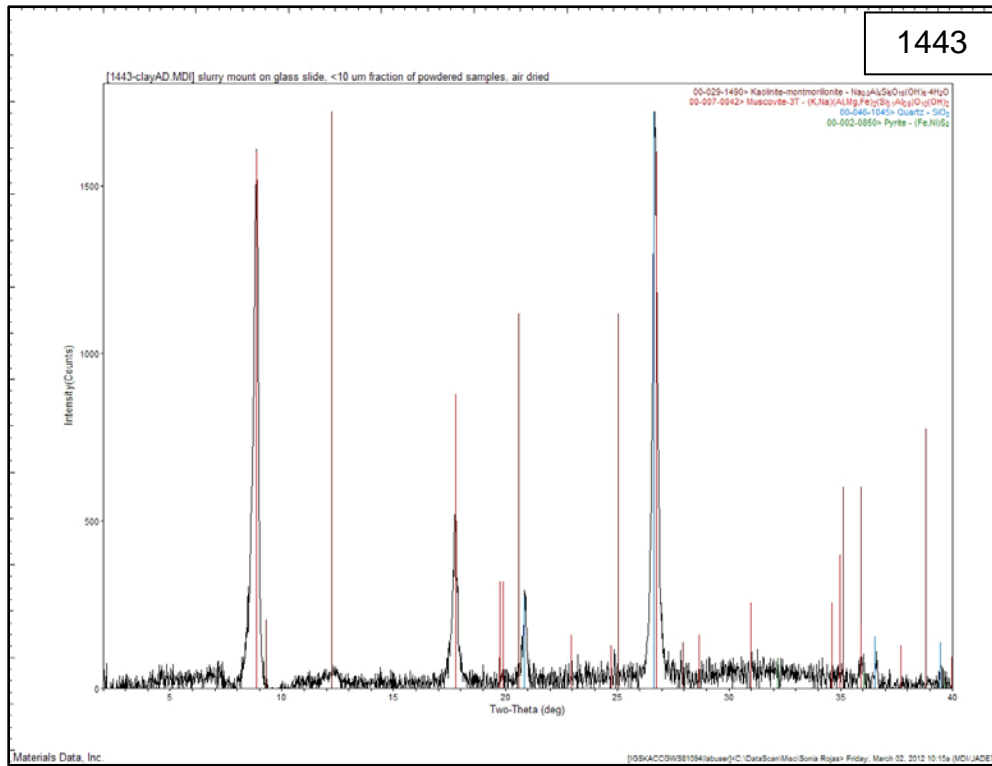
1428



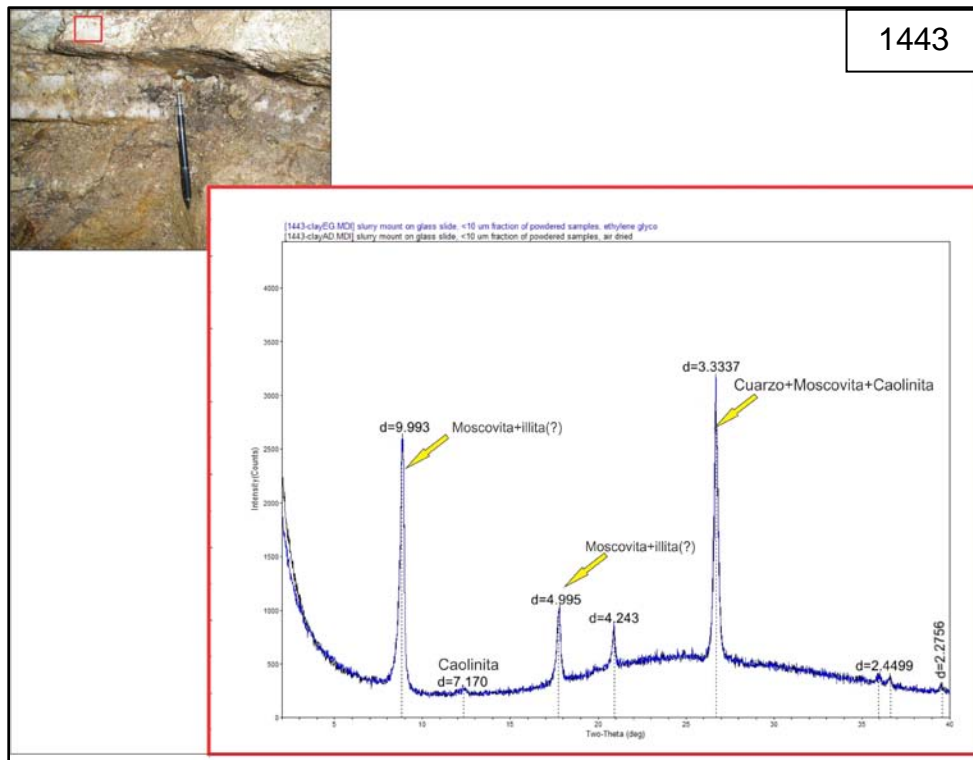
1428



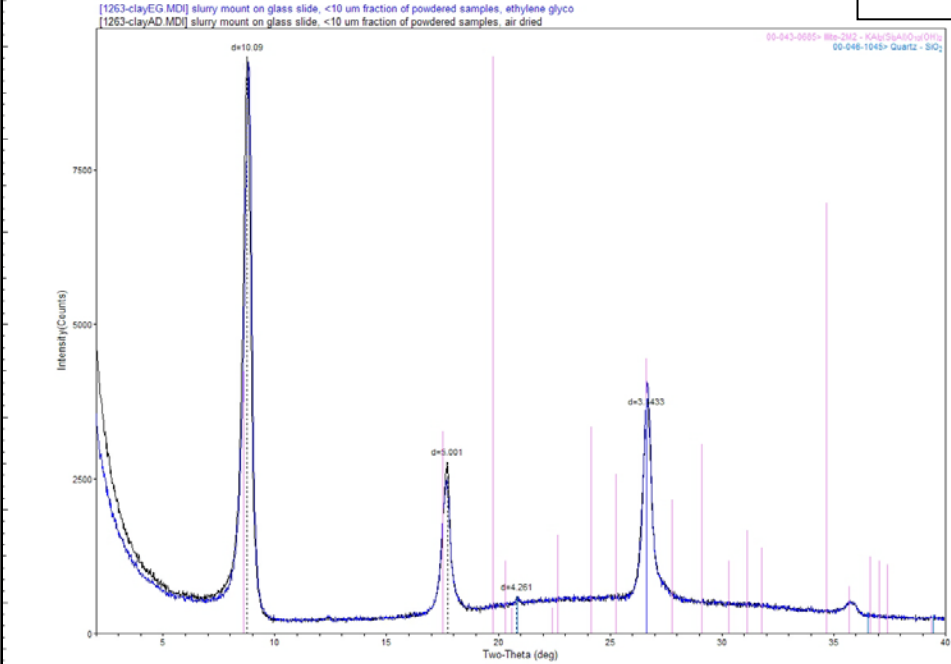
1443



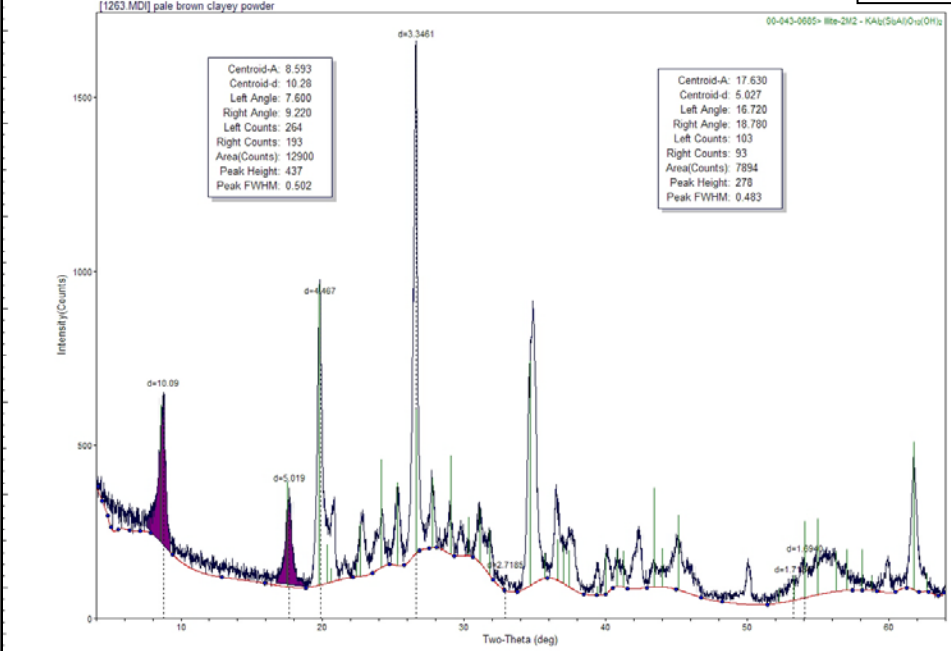
1443

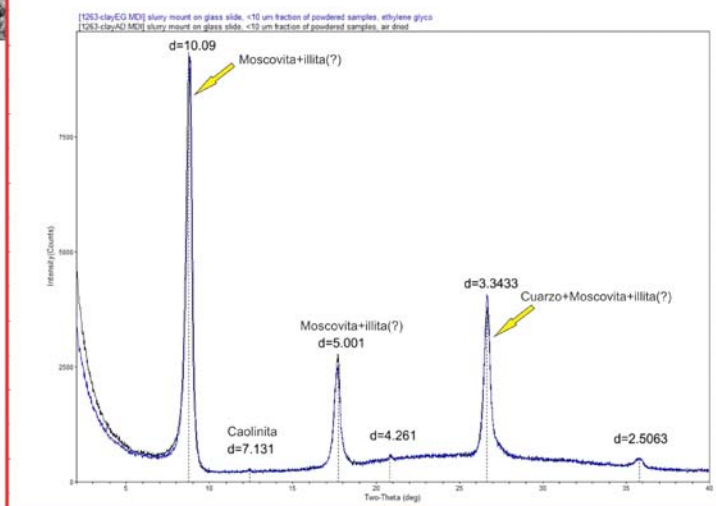


1263



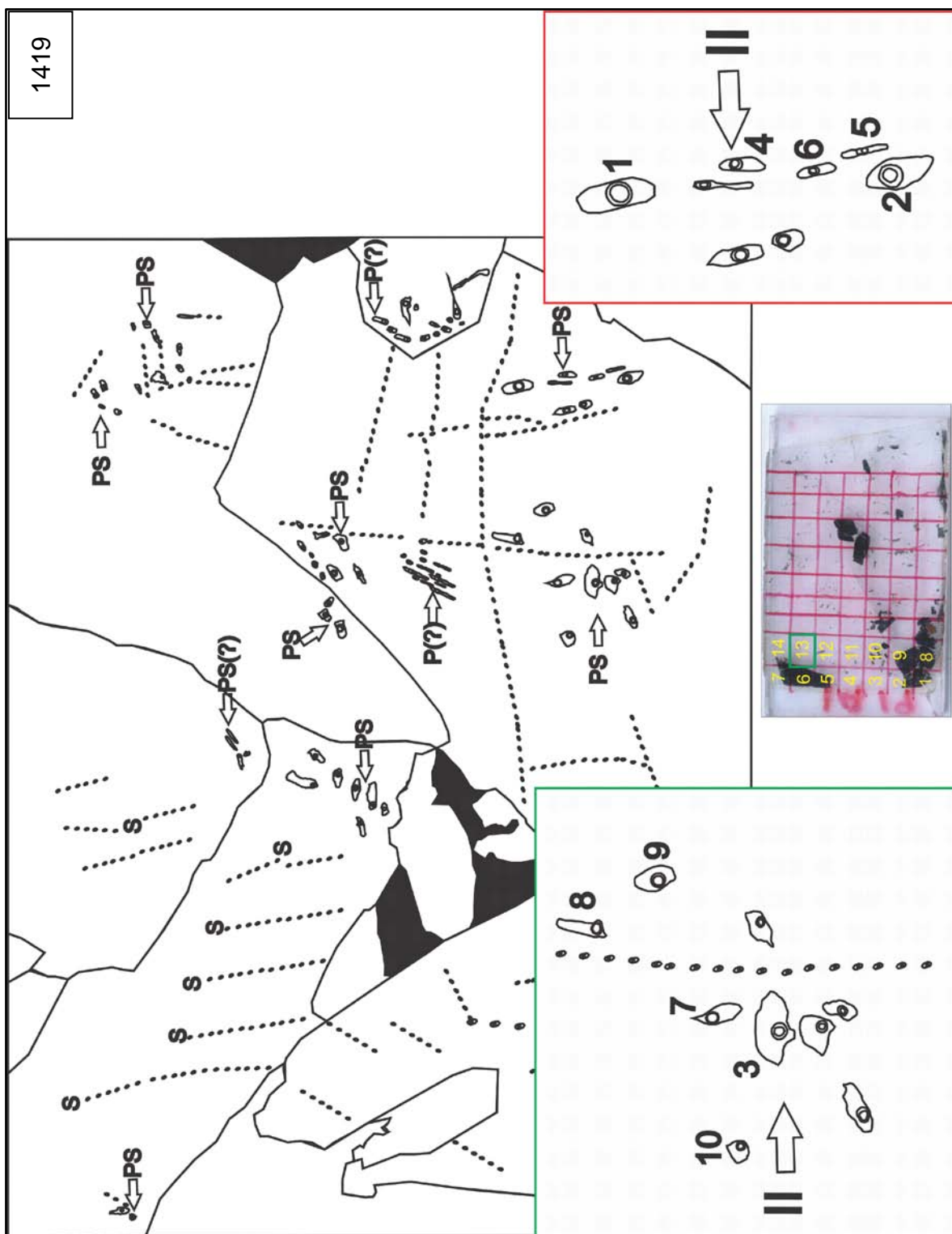
1263



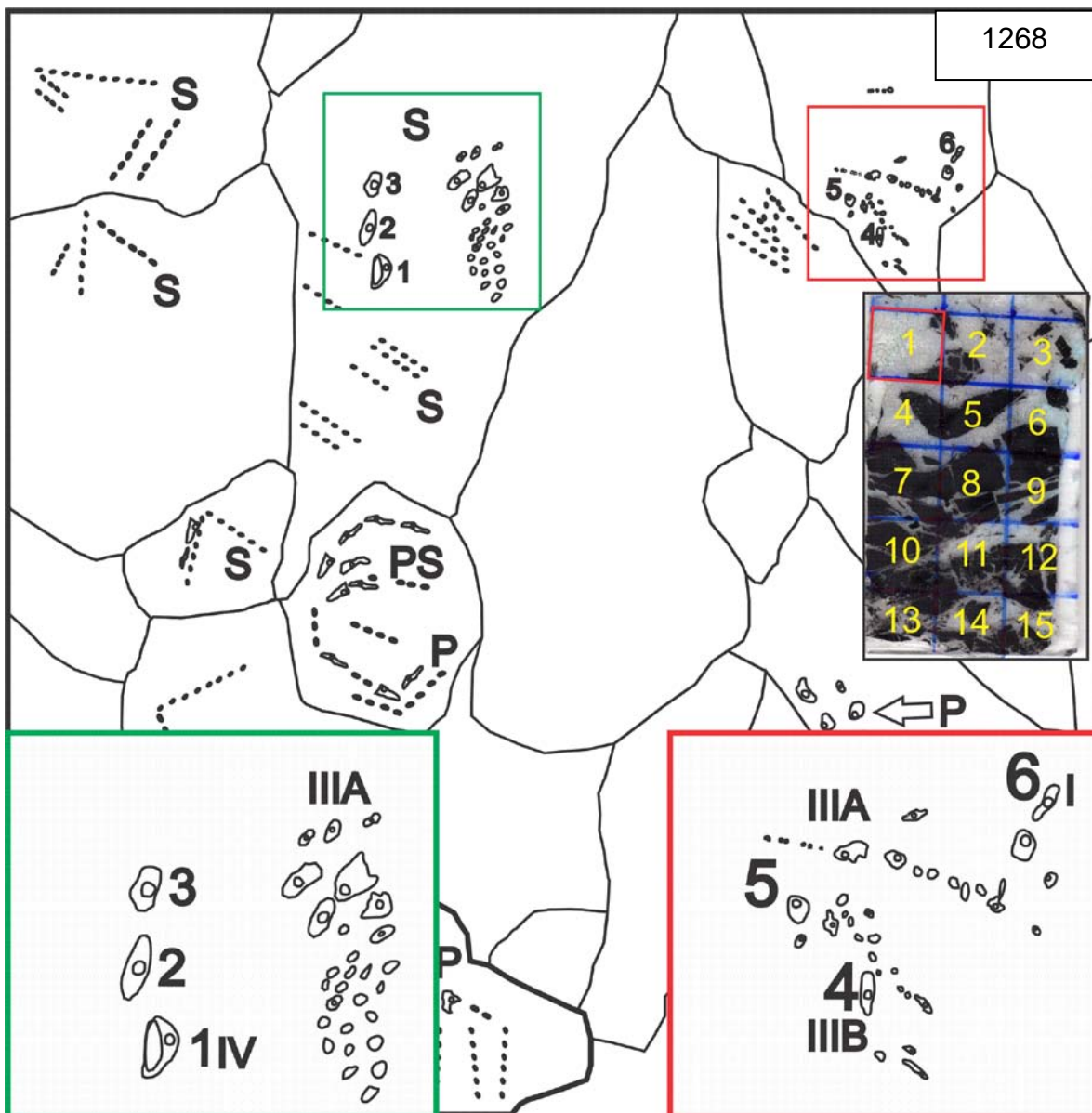


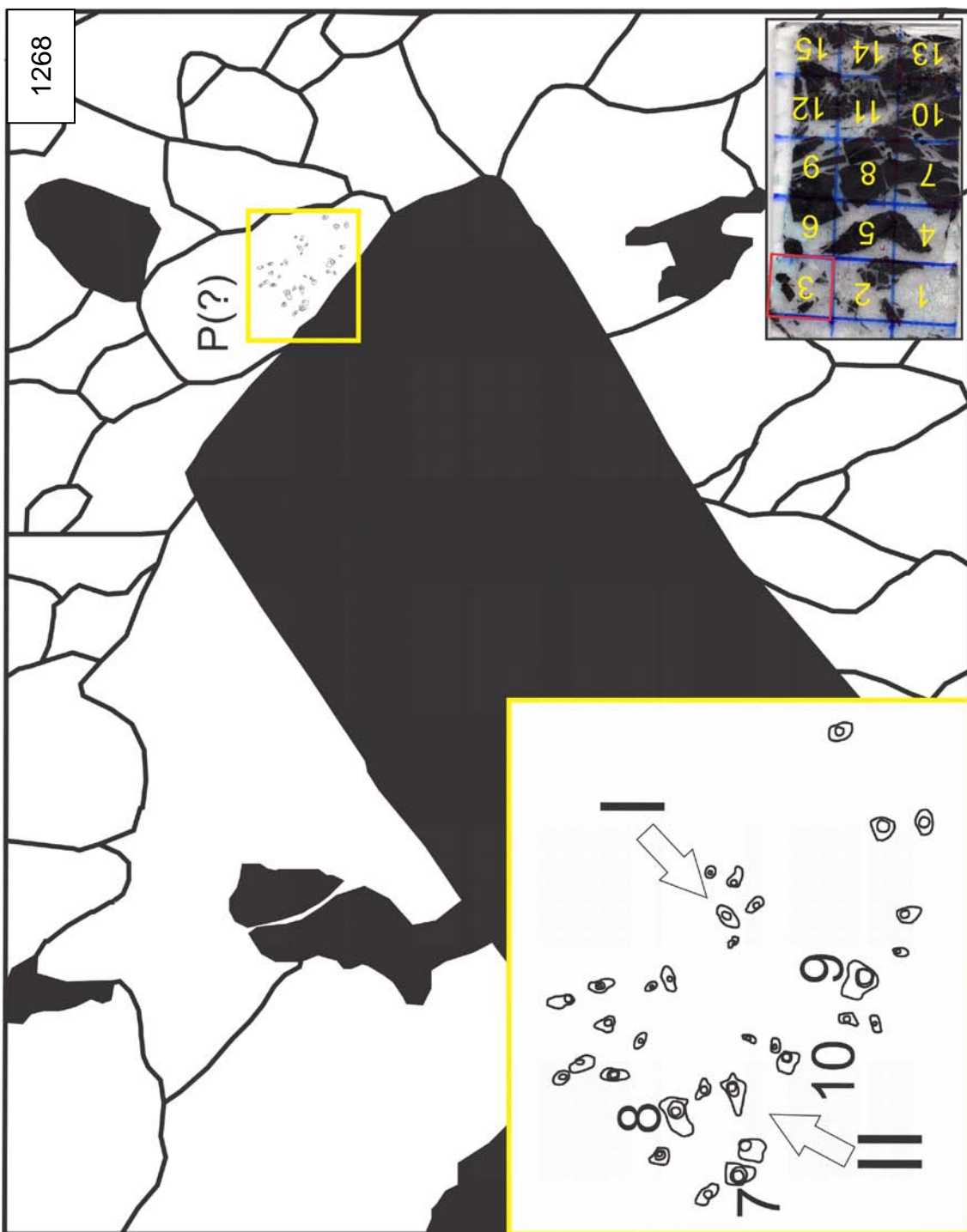
Minerals Data, Inc.

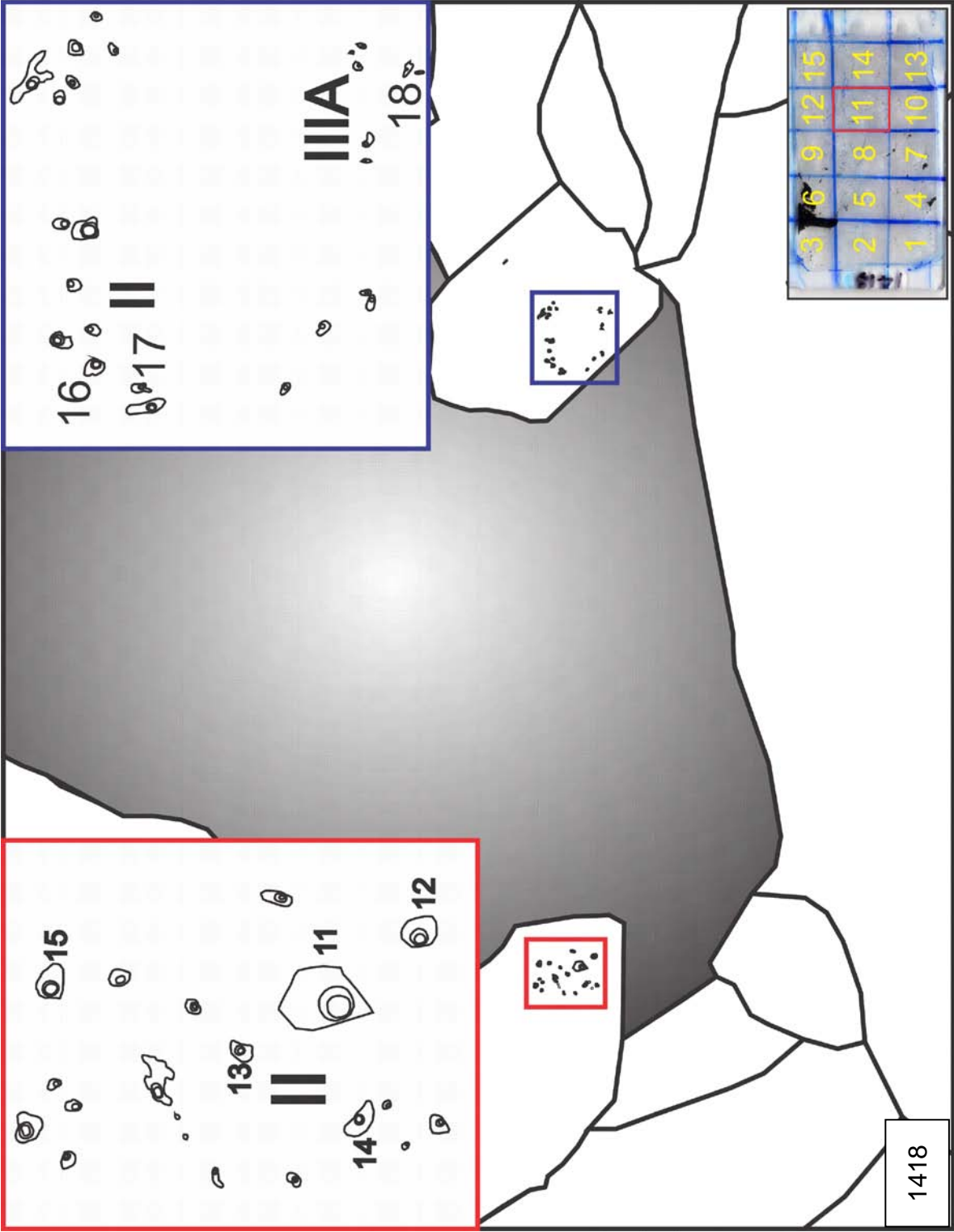
ANEXO 2. DIAGRAMAS DE INCLUSIONES FLUIDAS

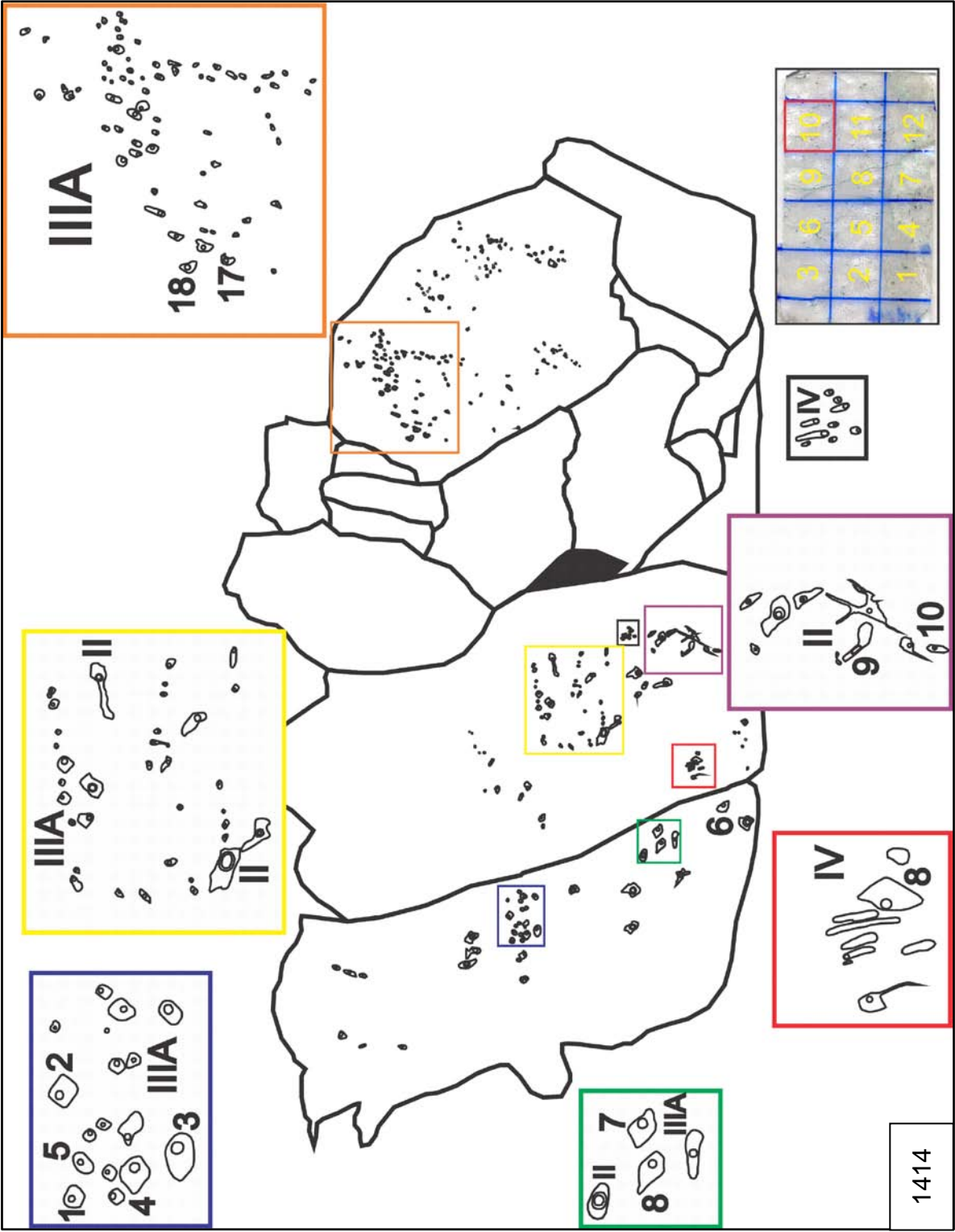


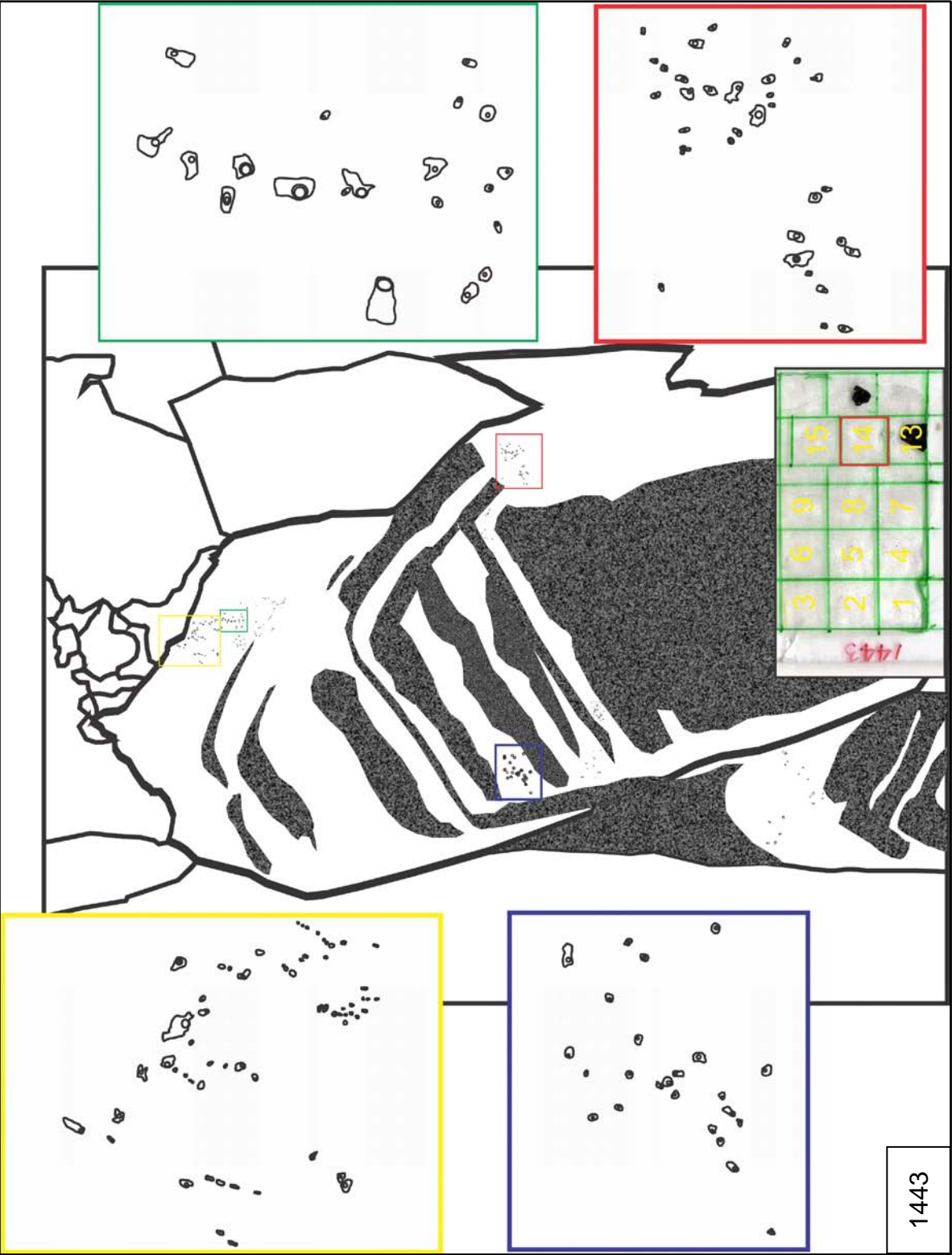
1268











ANEXO 3. DATOS MICROTERMOMÉTRICOS DE INCLUSIONES FLUIDAS

3.1 INCLUSIONES TIPO I

MUESTRA	Nº Inclusión	TAMANO	L/V	TmCO2	Te	Tmlce	TmClath	MODO	Th	MODO
1428(b)	10	6,77	4,65		-24,8	-10,2	8,8		241,6	L
1428(b)	15	10,08	3,97		-23,2	-3,3	4,7		248,6	L
1428(b)	16	7,58	5,93		-21	?	4,5		236,2	L
1418	34	10,09	6,85	-56,7	-22,3	-3,3	7,6	L	244,8	L
1419	39	30,38	9,23	-56,5	-21,6	-6,7	?	L	?	?
1419	40	13,68	5,50		?	-3,1	6	L	266,6	L
1419	43	15,4	4,72	-57,8	-21,5	-3,8	5,1	L	259,6	L
1419	44	23,54	6,33	-58,1	-21,4	-3,4	5,6	L	272,9	L
1414	64	8,7	5,11		-23,1	-5,5	?		259,2	L
1414	66	16,32	4,86		-23,4	-5,4	?		245	L
1443	74	4,71	5,77		-21,8	-6,1	6,7		327,4	L
1443	75	5,72	4,93		-27,9	-7,2	6,6		295,5	L
1443	76	6,97	4,78		-23,2	-6,7	7,4		299,1	L
1443	77	6,49	5,52		-24,3	-6	6,9		275,9	L
1443	79	14,62	7,42	-57,4	-22,7	-6,9	7,6	L	271,2	L
1443	81	6,9	14,68		-22,8	-6,5	?		272,6	L
1443	82	6,78	6,43		-22,7	-6,8	7,1		255,3	L
1443	83	5,06	3,82		-23,7	-9,5	6,1		313,5	L
1443	84	7,7	3,89		-23,4	-9,1	6,1		292,6	L
1443	86	7,58	7,67		-23,4	-8,2	6		237,8	L
1268	92	9,78	6,29		-23,3	-2,8	?		349,8	L
1268	95	7,06	2,97	-56,9	-21,9	-8,4	7,1	L	270,2	L
1268	96	7,64	5,65		-21,3	-8	?		250,8	L

3.2 INCLUSIONES TIPO II

MUESTRA	Nº Inclusión	TAMANO	L/V	TmCO2	Te	Tmlce	TmClath	ThCO2	MODO	Th	MODO	Tdec
1428(b)	1	31,4	4,13	-58,50	-21,3	?	5,1	30,8	L	266,4	L	267,2
1428(b)	2	13,24	5,21	-56,7	-21,6	?	6,4	30,6	L	246,6	L	
1428(b)	3	8,73	12,06	-58,8	-20,9	?	6,1	30,5	L	253,3	L	
1428(b)	4	12,58	10,42	?	-21,9	?	6	29,7	L	247,4	L	
1428(b)	5	14,33	8,74	-58,2	-21,5	?	5,6	30,2	L	265,5	L	
1428(b)	6	14,9	9,44	-56,6	-21,1	?	10,3	29,6	L	252,3	L	
1428(b)	7	10,86	12,07	-53,4	-21,4	?	6,5	30,4	L	248,7	L	
1428(b)	8	21,81	4,16	-53,8	?	?	6,2	29,6	L	282,3	L	
1428(b)	9	12,89	3,10	?	?	?	6,4	29,7	L	253,2	L	
1428(b)	11	14,21	8,34	-59,1	-25	-4,1	7	29,7	L	259,1	L	
1428(b)	12	10,78	18,50	-57,4	?	-2,7	6,9	?	?	248,7	L	
1428(b)	13	17,57	6,11	-60,3	-23	-3,7	6	30,5	L	243	L	
1428(b)	14	16,67	4,36	-58,4	-21,3	-3,4	5,3	29,7	L	?	?	259,4
1428(b)	17	16,36	7,88	-57,7	?	-3,1	7	29,7	L	258	L	
1418	18	8,77	11,73	-58	-21,6	-1,9	5,8	29,8	L	256	L	
1418	19	9,54	4,07	-57,9	-21,6	-2,9	6,5	29,6	L	257,1	L	
1418	20	12,1	2,72	-57,6	-21,4	-3,1	7,3	30	L	250,9	L	
1418	21	13,41	2,61	-57,6	-21,8	-3	6,8	30	L	251,8	L	
1418	22	18,45	9,40	-57,4	-21,7	-3,1	6,1	30	L	269	L	
1418	26	7,71	12,44	-57,7	-18,9	-3,3	6,4	29,7	L	254,6	L	
1418	28	34,38	7,08	-58,4	-23,9	-4,8	6,2	29,9	L	259	L	
1418	29	14,96	6,62	-56,9	-23,1	-4,9	6,4	30	L	258,7	L	
1418	30	9,76	8,68	-57,1	-21,9	-4,6	6,3	29,9	L	248,3	L	
1418	31	15,36	15,14	-56,7	-22,6	-4,7	5,9	30	L	259,7	L	
1418	32	14,69	5,28	-57,7	-22,3	-4,1	6,1	29,9	L	263,5	L	
1418	33	9	7,32	-57,5	-22,3	-6,3	7,7	30,4	L	244,9	L	
1418	36	17,22	7,56	-57,3	-22,4	-6,1	7,8	30	L	251,3	L	
1419	37	35,14	5,27	-57,7	-21,5	-3,2	5,7	29,8	L	265,3	L	
1419	38	18,82	6,44	-54,5	-21	-3,3	6,1	29,8	L	268,7	L	270,1
1419	41	14,12	12,01	-57,6	-23	-3	6,2	29,5	L	257,5	L	
1419	42	10,89	7,51	-57	-20,2	?	6,1	30	L	260,2	L	
1419	45	19,59	5,87	-55,6	-23,4	-3,3	6,4	30,5	L	248,8	L	
1419	46	17,75	11,05	-56,8	-21,8	-3,1	6,1	29,6	L	221,9	L	

3.2 INCLUSIONES TIPO II (Continuación)

MUESTRA	Nº Inclusión	TAMAÑO	L/V	TmCO2	Te	Tmlce	TmClath	ThCO2	MODO	Th	MODO	Tdec
1414	55	42,46	8,99	?	-22,5	-5,9	7,7	23,6	L	213,9	L	
1414	58	34,43	4,82	-57,7	-22,8	-7,1	8	30,3	L	244	L	
1414	59	17,44	4,52	-57,4	-23,3	-7,1	8,1	28,7	L	238,4	L	
1414	60	13,65	4,81	-57,5	-22,6	-6,1	8,2	29,8	L	231,2	L	
1414	62	10,41	7,68	-57,8	-22,7	-6,8	8,2	30	L	260,4	L	
1443	68	13,55	18,44	-57,7	-22,7	-4,6	6,7	30,8	L	253,2	L	
1443	70	5,21	6,02	-57,4	-23,5	-6,3	5,1	29,9	L	247	L	
1443	72	10,26	16,43	-57,4	?	-6,6	7,4	30,9	L	224,4	L	
1443	73	6,88	15,81	-57	-22,6	-7	7,1	30,6	L	306,5	L	
1443	78	13,73	4,67	-57	-23,8	-6,9	7	30,4	L	267,2	L	
1443	80	8,73	14,58	-57,3	-23,3	-5,8	6,8	30,3	L	280,6	L	
1443	85	12,43	3,60	-57,3	?	?	7,4	29,9	L	303,9	L	
1268	93	8	3,11	-58,1	-22,5	-8	7,2	30,7	L	304,6	L	
1268	94	9,12	8,98	-59	-22,4	?	6,6	29,7	L	240,7	L	

3.3 INCLUSIONES TIPO III Y IV

MUESTRA	Nº Inclusión	TIPO	TAMAÑO	L/V	Te	Tmlce	Th	MODO
1418	23	IIIA	11,43	7,37	-22,8	-5	187,9	L
1418	24	IIIB	7,35	7,67	-23,1	-6,1	168,1	L
1418	25	IIIB	7,57	12,61	-22,2	-6	154,6	L
1418	27	IIIA	7,51	5,60	-22,6	-5,2	209,4	L
1418	35	IIIA	8,08	9,14	-23,3	-7,6	168,7	L
1414	47	IIIA	8,41	9,83	-22,7	-2,8	197,5	L
1414	48	IIIA	10,37	7,08	-22,8	-5,1	177,3	L
1414	49	IIIA	9,81	5,42	-22,7	-5,8	185,2	L
1414	50	IIIA	8,49	8,12	-23,1	-4,8	179,6	L
1414	51	IIIA	6,62	6,69	-22,3	-4,5	192,1	L
1414	52	IIIA	25,41	9,82	-23,2	-4	158,9	L
1414	53	IIIA	16,21	9,95	-22,7	-4,3	170,2	L
1414	54	IIIB	16,3	12,19	-20,7	-2	135,6	L
1414	56	IIIA	25,73	9,19	-22,1	-4,1	165	L
1414	57	IIIA	24,25	9,48	-23,4	-4,3	181,7	L
1414	61	IIIA	25,57	4,66	-22,9	-5,5	175,5	L
1414	63	IV	12,68	8,70	-23,2	-4,1	179,2	L
1414	65	IV	13,23	7,62	-23,1	-5,7	177,4	L
1443	67	IIIB	12,8	12,45	-22,6	-5,1	151,2	L
1443	69	IIIB	5,59	9,14	-20,6	-3,1	131,3	L
1443	71	IIIA	10,09	10,99	-22,7	-7,6	174	L
1268	87	IV	12,15	13,89	-23,5	-7,7	131,5	L
1268	88	IIIB	7,79	8,04	-12,5	-6,4	159,1	L
1268	89	IIIA	7,72	6,22	-23,1	-7,1	203,3	L
1268	90	IIIB	10	12,13	-10	-6,3	144	L
1268	91	IIIA	6,56	8,48	-22,8	-6,4	208,5	L

ANEXO 4. ESPECTROSCOPIA RAMAN

